



## ANÁLISE EXERGoeCONÔMICA AVANÇADA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO OTIMIZADO

Bruno Seixas Gomes de Almeida

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Manuel Ernani de Carvalho Cruz

Rio de Janeiro  
Outubro de 2018

ANÁLISE EXERGONOMIA AVANÇADA DE UM SISTEMA DE  
COGERAÇÃO OTIMIZADO

Bruno Seixas Gomes de Almeida

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Examinada por:

---

Prof. Manuel Ernani de Carvalho Cruz, Ph.D.

---

Prof. Nísio de Carvalho Lobo Brum, D.Sc.

---

Dr. Leonardo dos Santos Reis Vieira, D.Sc.

---

Prof. Carlos Eduardo Leme Nóbrega, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
OUTUBRO DE 2018

Almeida, Bruno Seixas Gomes de

Análise Exergoeconômica Avançada de um Sistema de Cogeração Otimizado / Bruno Seixas Gomes de Almeida. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XV, 99 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Manuel Ernani de Carvalho Cruz

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Mecânica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 88-90.

1. Otimização. 2. Análise Exergoeconômica Avançada. 3. Sistema de Cogeração. I. Cruz, Manuel Ernani de Carvalho. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

## Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por ter me dado saúde para ter chegado até aqui e por ser sempre a maior força com que posso contar.

Aos meu pais, Cesar e Márcia, por estarem sempre presentes na minha vida, serem meu conforto e fonte inesgotável de amor.

Ao meu irmão, Diego, melhor ser humano que já conheci, meu maior amigo, por todo o companheirismo, atenção, e por estar sempre disposto a me ouvir e ter as melhores palavras para me fornecer em todos os momentos. Muito obrigado por tudo.

Aos meus avós, Afonso, Janete, José e Generosa (*in memoriam*), por serem meus maiores exemplos de superação e força na vida.

Ao meu tio, Robson (*in memoriam*), que está presente em nossas lembranças e, onde estiver, está intercedendo por mim e toda minha família.

A meu grande amor, Marina, por ser a melhor companheira que eu poderia ter, por todo o apoio, carinho e amor sempre. Muito obrigado por tornar a caminhada da vida muito mais leve e feliz. Seu apoio foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP), em especial ao Kletson pela compreensão em relação às minhas obrigações com o Mestrado e por nunca ter se negado a me ajudar no que era possível.

Ao meu grande amigo, Paulo, por todo auxílio durante o mestrado e por sempre se mostrar solícito em me ajudar. Seu coração é tão grande quanto sua inteligência.

Ao Professor Manuel, por toda orientação, auxílio e sugestões durante a execução da dissertação.

Ao Leonardo, pelos ensinamentos do IPSE e por sempre ter se mostrado solícito em auxiliar e contribuir com o trabalho.

Aos Professores Nísio e Carlos, por terem aceito o convite para comporem a banca.

A todos os meus amigos e familiares que não foram citados, mas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## ANÁLISE EXERGoeCONÔMICA AVANÇADA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO OTIMIZADO

Bruno Seixas Gomes de Almeida

Outubro/2018

Orientador: Manuel Ernani de Carvalho Cruz

Programa: Engenharia Mecânica

A análise exergoeconômica avançada tem sido utilizada com frequência em inúmeros trabalhos recentes para analisar sistemas térmicos variados. A análise avançada permite, além da quantificação da destruição exergética e dos custos de investimento e destruição, a fragmentação destes em parcelas evitáveis, inevitáveis, endógenas e exógenas. Nesse contexto, o presente trabalho buscou comparar os resultados da análise exergoeconômica avançada em diferentes condições de operação de um sistema de cogeração otimizado e avaliar as diferenças em relação à análise exergoeconômica convencional. Para isso, foram analisadas três condições: sistema operando em menor custo, sistema operando em maior eficiência exergética e sistema operando em uma condição tomada arbitrariamente. Para a obtenção das condições de menor custo e maior eficiência, foram utilizadas rotinas de otimização baseadas em métodos híbridos. Verificou-se uma diferença significativa entre os resultados da análise exergoeconômica avançada em relação a cada condição de operação. Além disso, notou-se que a análise exergoeconômica avançada conduziria a uma ordem de priorização dos equipamentos diferente daquela obtida com a convencional, num processo de melhoria do sistema. Em função dos resultados encontrados, sugere-se a elaboração de um algoritmo de otimização associado com a análise avançada para facilitar o caminho até a condição ótima procurada.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## ADVANCED EXERGoeCONOMIC ANALYSIS OF AN OPTIMIZED COGENERATION SYSTEM

Bruno Seixas Gomes de Almeida

October/2018

Advisor: Manuel Ernani de Carvalho Cruz

Department: Mechanical Engineering

The advanced exergoeconomics analysis has been used frequently in numerous recent studies to analyze thermal systems in general. In addition to the quantification of exergy destruction, destruction costs and investments, the advanced analysis allows the fragmentation of these terms in avoidable, unavoidable, endogenous and exogenous parts. In this context, the present work aims to compare the results of the advanced economic analysis in different operating conditions of an optimized cogeneration system and to evaluate the differences between the advanced and conventional exergoeconomics analyses. To do so, three conditions are analyzed: system operating with minimum cost, system operating with maximum exergetic efficiency and system operating in an arbitrary condition. In order to obtain the lowest cost and highest efficiency conditions, optimization routines based on hybrid methods were used. There was a significant difference between the results of the advanced exergoeconomic analysis in each operating condition. In addition, it was noted that the advanced exergoeconomic analysis would lead to a different ranking of the equipment than the conventional one, for the improvement of the system. Based on the results, it is proposed the development of an optimization algorithm associated with the advanced exergoeconomic analysis to facilitate the path to the optimal condition.

# Sumário

1. Introdução .....	1
1.1 Motivação .....	1
1.2 Objetivo.....	5
1.3 Organização do Trabalho.....	5
2. Revisão Bibliográfica .....	7
2.1Análise Exergética Convencional .....	7
2.2 Análise Exergética Avançada .....	10
2.2.1 Destruição Exergética Evitável e Inevitável .....	11
2.2.2 Destruição Exergética Endógena e Exógena.....	12
2.3 Análise Exergoeconômica Convencional .....	16
2.4 Análise Exergoeconômica Avançada.....	19
2.4.1 Custos de Destruição Evitável/Inevitável e Endógeno/Exógeno .....	20
2.4.2 Taxas de Investimento Evitável/Inevitável e Endógeno/Exógeno .....	20
2.5 Otimização .....	21
3. Metodologia.....	27
3.1 Metodologia de Otimização .....	27
3.2 Metodologia de Análise Exergoeconômica Avançada .....	29
4. Estudo de Caso - Sistema CGAM .....	32
4.1 Descrição do Sistema.....	32
4.2 Modelo Termodinâmico.....	33
4.3 Modelo Econômico.....	33
4.4 Eficiência Exergética .....	36
4.5 Critérios para Otimização .....	36
4.6 Determinação do Ponto Arbitrário.....	37
4.7 Critérios para Análise Exergética Avançada .....	37
4.7.1 Destruição Exergética, Custos de Destruição Exergética e Taxas de Investimento Evitáveis e Inevitáveis.....	37
4.7.2 Destruição Exergética, Custos de Destruição Exergética e Taxas de Investimento Endógenas e Exógenas .....	43
5. Resultados.....	46
5.1 Condição de Menor Custo .....	46

5.1.1 Otimização .....	46
5.1.2 Análise Exergoeconômica Convencional e Avançada.....	48
5.2 Condição de Maior Eficiência .....	56
5.2.1 Otimização .....	56
5.2.2 Análise Exergoeconômica Convencional e Avançada.....	57
5.3 Condição Arbitrária .....	66
5.3.1 Análise Exergoeconômica Convencional e Avançada.....	66
5.4 Comparação dos Resultados .....	73
5.4.1 Comparação dos Resultados da Análise Exergoeconômica Convencional e Avançada nas diferentes Condições de Operação.....	73
5.4.2 Comparação entre Análise Exergoeconômica Convencional e Avançada.....	78
6. Conclusões.....	86
7. Referências Bibliográficas.....	88
ANEXO A - Sistema CGAM proposto por VALERO <i>et al.</i> ....	91
ANEXO B – Otimização da Função Objetivo (Custo).....	94
ANEXO C – Otimização da Função Objetivo (Eficiência Exergética).....	97



## Lista de Figuras

Figura 1. Aumento da Demanda Energética Brasileira [1]. .....	1
Figura 2. Matriz de capacidade instalada de geração de energia elétrica do Brasil sem importação contratada (novembro/2016) [2]. .....	2
Figura 3. Exemplo de sistema para ilustração. ....	12
Figura 4. Determinação da Parcela Endógena pelo Método de Engenharia. ....	15
Figura 5. Evolução das publicações envolvendo métodos Híbridos [25]. .....	23
Figura 6. Fluxograma do programa de otimização. ....	29
Figura 7. Sistema CGAM. ....	32
Figura 8. Sistema CGAM representado no IPSEpro. ....	33
Figura 9. Influência da eficiência isentrópica na eficiência exergética do Compressor. ....	39
Figura 10. Influência da diferença mínima de temperatura na eficiência exergética do pré-aquecedor. ....	39
Figura 11. Influência da temperatura de entrada na eficiência exergética da câmara de combustão. ....	40
Figura 12. Influência da queda de pressão na eficiência exergética da câmara de combustão. ....	40
Figura 13. Influência da eficiência isentrópica na eficiência exergética da Turbina. ....	41
Figura 14. Influência da temperatura de entrada da Caldeira na eficiência exergética. ....	42
Figura 15. Influência da queda de pressão da Caldeira na eficiência exergética. ....	42
Figura 16. Comparação entre o número de chamadas da função objetivo para cada método. ....	47
Figura 17. Comparação entre o tempo computacional de cada método. ....	47
Figura 18. Comparação entre os resultados obtidos e referências bibliográficas. ....	48
Figura 19. Destruição exergética para ponto de menor custo. ....	49
Figura 20. Custos de destruição e taxas de investimento para ponto de menor custo. ....	50
Figura 21. Destruição exergética evitável e inevitável para o ponto de menor custo. ....	51
Figura 22. Custos de destruição e taxas de investimento evitáveis e inevitáveis para ponto de menor custo. ....	52
Figura 23. Determinação da destruição exergética endógena do Compressor. ....	53
Figura 24. Determinação da destruição exergética endógena da Câmara de Combustão. ....	53
Figura 25. Determinação da destruição exergética endógena da Turbina a Gás. ....	53
Figura 26. Determinação da destruição exergética endógena do Pré-Aquecedor. ....	54
Figura 27. Destruição exergética endógena e exógena para o ponto de menor custo. ....	54
Figura 28. Custos de destruição e taxas de investimento endógenos e exógenos para ponto de menor custo. ....	55
Figura 29. Comparação entre o tempo de execução de cada método. ....	57
Figura 30. Comparação entre o número de chamadas da função objetivo de cada método. ....	57
Figura 31. Destruição exergética para ponto de maior eficiência. ....	58

Figura 32. Custos de destruição e taxas de investimento para ponto de maior eficiência.	59
Figura 33. Destruição exergetica evitável e inevitável para o ponto de maior eficiência.	60
Figura 34. Custos de destruição e taxas de investimento evitáveis e inevitáveis para ponto de maior eficiência.	61
Figura 35. Determinação da destruição exergetica endógena do Compressor.	62
Figura 36. Determinação da destruição exergetica endógena da Câmara de Combustão.	62
Figura 37. Determinação da Parcela Endógena Turbina a Gás.	63
Figura 38. Determinação da destruição exergetica endógena do Pré-Aquecedor.	63
Figura 39. Destruição exergetica endógena e exógena para o ponto de maior eficiência.	64
Figura 40. Custos de destruição e taxas de investimento endógenos e exógenos para ponto de maior eficiência.	65
Figura 41. Destruição exergetica para ponto arbitrário.	66
Figura 42. Custos de destruição e taxas de investimento para ponto arbitrário.	67
Figura 43. Destruição exergetica evitável e inevitável para o ponto arbitrário.	68
Figura 44. Custos de destruição e taxas de investimento evitáveis e inevitáveis para ponto arbitrário.	69
Figura 45. Determinação da destruição exergetica endógena do Compressor.	70
Figura 46. Determinação da destruição exergetica endógena da Câmara de Combustão.	70
Figura 47. Determinação da Parcela Endógena Turbina a Gás.	70
Figura 48. Determinação da destruição exergetica endógena do Pré-Aquecedor.	71
Figura 49. Destruição exergetica endógena e exógena para o ponto arbitrário.	71
Figura 50. Custos de destruição e taxas de investimento endógenos e exógenos para ponto de arbitrário.	72
Figura 51. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 1.	94
Figura 52. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 2.	94
Figura 53. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 3.	95
Figura 54. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 4.	95
Figura 55. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 5.	96
Figura 56. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 6.	96
Figura 57. Evolução da Função Objetivo para o Híbrido 1.	97
Figura 58. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 2.	97
Figura 59. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 3.	98
Figura 60. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 4.	98
Figura 61. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 5.	99
Figura 62. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 6.	99

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Métodos Híbridos utilizados.....	28
Tabela 2. Constantes de custo para os componentes. ....	35
Tabela 3. Limites das variáveis para otimização. ....	36
Tabela 4. Parâmetros escolhidos para otimização. ....	37
Tabela 5. Variáveis do ponto arbitrário. ....	37
Tabela 6. Variáveis e valores escolhidos para condições de maior e menor eficiência exergética. ....	43
Tabela 7. Variáveis alteradas para determinação das parcelas endógenas. ....	45
Tabela 8. Resultados para cada Método Híbrido. ....	46
Tabela 9. Destruição exergética para ponto de menor custo. ....	49
Tabela 10. Custos de destruição e taxas de investimento para ponto de menor custo. ..	49
Tabela 11. Destruição exergética evitável e inevitável para o ponto de menor custo. ...	51
Tabela 12. Custos de destruição e taxas de investimento evitáveis e inevitáveis para ponto de menor custo. ....	52
Tabela 13. Destruição exergética endógena e exógena para o ponto de menor custo....	54
Tabela 14. Custos de destruição e taxas de investimento endógenos e exógenos para ponto de menor custo. ....	55
Tabela 15. Resultado para cada Método Híbrido. ....	56
Tabela 16. Destruição exergética para ponto de maior eficiência. ....	58
Tabela 17. Custos de destruição e taxas de investimento para ponto de maior eficiência. ....	59
Tabela 18. Destruição exergética evitável e inevitável para o ponto de maior eficiência. ....	60
Tabela 19. Custos de destruição e taxas de investimento evitáveis e inevitáveis para ponto de maior eficiência. ....	61
Tabela 20. Destruição exergética endógena e exógena para o ponto de maior eficiência. ....	63
Tabela 21. Custos de destruição e taxas de investimento endógenos e exógenos para ponto de maior eficiência. ....	64
Tabela 22. Destruição exergética para ponto arbitrário. ....	66
Tabela 23. Custos de destruição e taxas de investimento para ponto arbitrário. ....	67
Tabela 24. Destruição exergética evitável e inevitável para o ponto arbitrário. ....	68
Tabela 25. Custos de destruição e taxas de investimento evitáveis e inevitáveis para ponto arbitrário. ....	69
Tabela 26. Destruição exergética endógena e exógena para o ponto arbitrário. ....	71
Tabela 27. Custos de destruição e taxas de investimento endógenos e exógenos para ponto arbitrário. ....	72
Tabela 28. Comparação entre a condição de menor custo e a arbitrária. ....	74
Tabela 29. Comparação entre a condição de menor custo e a de maior eficiência. ....	76
Tabela 30. Comparação entre Análise Exergoeconômica Avançada e Convencional utilizando o critério baseado na exergia destruída. ....	79

Tabela 31. Comparação entre Análise Exergoeconômica Avançada e Convencional utilizando o critério baseado em custos totais. ....	80
Tabela 32. Desvio entre a condição Ótima (Ponto Eficiência) e Não-ótima (Ponto Arbitrário) utilizando a exergia destruída.....	81
Tabela 33. Desvio entre a condição Ótima (Ponto Eficiência) e Não-ótima (Ponto Econômico) utilizando a exergia destruída. ....	82
Tabela 34. Comparação entre a ordenação segundo os desvios de exergia destruída e as priorizações para Ponto Arbitrário (Não-Ótimo).....	82
Tabela 35. Comparação entre a ordenação segundo os desvios de exergia destruída e as priorizações para Ponto Econômico (Não-Ótimo). ....	82
Tabela 36. Desvio entre a condição Ótima (Ponto Econômico) e Não-ótima (Ponto Arbitrário) utilizando os custos totais.....	83
Tabela 37. Desvio entre a condição Ótima (Ponto Econômico) e Não-ótima (Ponto Eficiência) utilizando os custos totais. ....	84
Tabela 38. Comparação entre a ordenação segundo os desvios de custos totais e as priorizações para Ponto Arbitrário (Não-Ótimo).....	84
Tabela 39. Comparação entre a ordenação segundo os desvios de custos totais e as priorizações para Ponto Eficiência (Não-Ótimo). ....	84

## Nomenclatura

### Símbolos

$A$	Matriz de incidência
$\hat{A}$	Matriz custo do sistema
$\hat{C}$	Taxas de custos
$c$	Custos específicos
$CRF$	Fator de recuperação de capital
$d$	Direção de descida do método de otimização
$\dot{E}$	Taxa de exergia
$e$	Exergia específica
$E$	Exergia
$g$	Gravidade
$f$	Fator exergoeconômico
$H$	Hessiano
$\dot{m}$	Fluxo mássico
$M$	Parâmetro do método BFGS
$N$	Parâmetro do método BFGS
$P$	Pressão
$Q$	Calor
$r$	Diferença relativa de custos
$T$	Temperatura
$U$	Função Objetivo
$u$	Energia interna específica
$v$	Volume específico
$V$	Velocidade ou Parâmetro do algoritmo de exame de partículas
$V_{ol}$	Volume

$x$	Variável
$W$	Trabalho
$\dot{W}$	Potência
$X$	Vetor de variáveis
$Y$	Parâmetro do método BFGS
$y$	Razão de destruição de exergia
$z$	Altura
$\dot{Z}$	Taxas de investimento
$Z$	Vetor custos horários do sistema

### **Simbolos Gregos**

$\alpha$	Tamanho do passo da otimização ou indivíduo da população
$\beta$	Indivíduo da população
$\gamma$	Coefficiente de conjugação ou Indivíduo da população
$\delta$	Delta de Dirac
$\Delta TLM$	Diferença de temperatura média logarítmica
$\varepsilon$	Eficiência exergética
$\eta$	Eficiência
$\sigma$	Variação de entropia
$\varphi$	Fator de manutenção da planta térmica
$\nabla$	Gradiente

### **Subescritos**

$b$	Fronteira onde a transferência de calor ocorre
$D$	Destruída
$e$	Fluxo que entra no volume de controle
$F$	Combustível
$i$	Corrente i

$k$	Componente k
$L$	Perdas
$P$	Produto
$Q$	Relacionada a transferência de calor
$s$	Fluxo que sai do volume de controle
$st$	Vapor
$tot$	Total
$W$	Relacionada ao trabalho
0	Em relação ao estado morto

### **Sobrescritos**

$AV$	Evitável ( <i>Avoidable</i> )
$EN$	Endógeno ( <i>Endogenous</i> )
$EX$	Exógeno ( <i>Exogenous</i> )
$ID$	Ideal
$k$	Iteração k
$RE$	Real
$T$	Transposto
$UN$	Inevitável ( <i>Unavoidable</i> )
*	Modificado

# 1. Introdução

## 1.1 Motivação

Atualmente há uma preocupação cada vez maior na aplicação e utilização dos recursos energéticos disponíveis. Busca-se constantemente um uso mais eficiente da energia, sobretudo em indústrias onde os custos energéticos são muito significativos. Além do visível aumento populacional nos últimos anos, verifica-se que a população tem prezado por melhores padrões de vida que sempre vem associados a maiores consumos de energia.

Um estudo feito pela Empresa de Pesquisas Energéticas (2014) fez uma previsão do aumento da demanda energética por parte da população brasileira até o ano de 2050 [1]. Tal processo de estimativa da demanda de energia foi realizado a partir da elaboração de cenários setoriais da atividade agropecuária, serviços e indústria, além das demandas de infraestrutura, mobilidade e modelos setoriais específicos. Ao agrupar todos os cenários, foi estimada a evolução da demanda por fonte e por setor, em nível nacional. No relatório, para o período 2013-2050, estimou-se que a demanda brasileira total de energia irá aumentar consideravelmente, sendo pouco mais de duas vezes quando comparada com o ano base. A Figura 1 ilustra esse aumento de demanda.

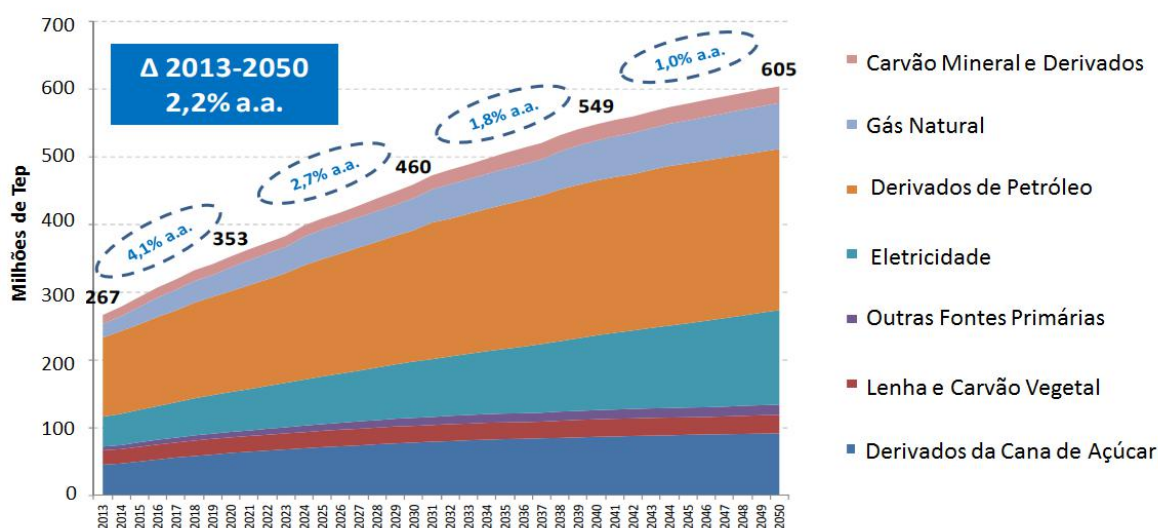


Figura 1. Aumento da Demanda Energética Brasileira [1].

Pode-se também fazer uma análise da participação de cada sistema de geração de energia elétrica nacional [2]. A Figura 2 indica a capacidade instalada no sistema elétrico brasileiro. Como é possível notar, a maior parte da energia elétrica gerada no



país é oriunda de hidroelétricas, seguida das usinas térmicas, como termelétricas convencionais e as termonucleares. Tais usinas são fundamentais para atender e assegurar o fornecimento de energia nacionalmente. Devido à sazonalidade de chuvas no país que influenciam diretamente os níveis dos reservatórios, a demanda de energia por vezes é suprida pela energia termoeletrica. Como visto, a participação dessas usinas somadas, representaram, em 2016, 28,9% da capacidade de geração de energia elétrica do país. Portanto, percebe-se a importância desses tipos de sistemas térmicos na geração de energia elétrica para o país. Nesse sentido, a melhoria desses sistemas térmicos representariam ganhos nacionais em termos de eficiência e disponibilidade.

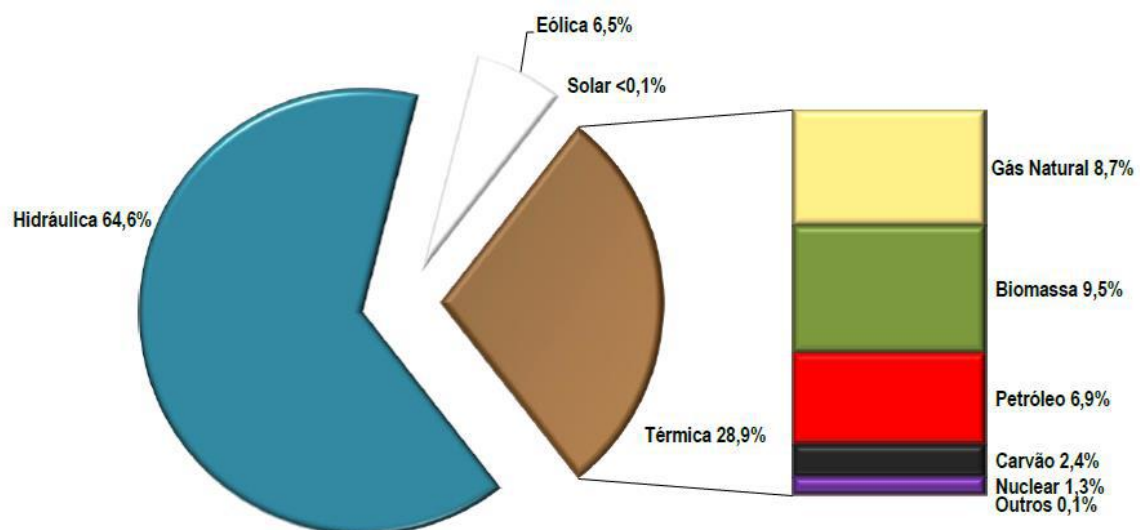


Figura 2. Matriz de capacidade instalada de geração de energia elétrica do Brasil sem importação contratada (novembro/2016) [2].

Além disso, é observado globalmente o aumento de políticas de restrições ambientais cada vez mais rígidas, sobretudo aquelas relacionadas ao uso de combustíveis fósseis que visam reduzir a utilização de tais fontes e, ao mesmo tempo, estimular o surgimento e desenvolvimento de fontes alternativas de energia. Portanto, torna-se fundamental a análise e melhoria da eficiência energética dos sistemas geradores de energia, de maneira a reduzir a necessidade de expansão da oferta de energia no longo prazo e reduzindo impactos ambientais decorrentes de novos projetos.

Em geral, para projetos e diagnóstico desses sistemas térmicos, faz-se uso de formulações e leis termodinâmicas, como a primeira e segunda leis da termodinâmica individualmente. Entretanto, o uso de tais conceitos isoladamente não é capaz de descrever o potencial de um sistema de realizar trabalho em relação a uma dada

condição. Para isso, é adequada a utilização do conceito de exergia, que resulta da combinação das duas leis. Basicamente, a exergia vai medir a qualidade da energia e vai garantir uma base comum de comparação entre processos distintos.

De uma maneira geral, uma análise exergética de um sistema térmico fornece informações para que se consiga uma melhor utilização dos recursos energéticos envolvidos, buscando reduzir a destruição de exergia no interior do sistema e/ou reduzindo as perdas. Além disso, é possível, uma vez identificados os componentes em que ocorram destruição e perdas de exergia, classificá-los por ordem de importância, permitindo que uma maior atenção seja dada a esses componentes e oferecendo maiores oportunidades para melhorias [3].

Como exemplo, considera-se a análise de um sistema de um ciclo Rankine. Uma análise com base na primeira lei de um ciclo simples de uma turbina a vapor em um ciclo Rankine revela que cerca de 50% da energia disponível no combustível é perdida no condensador e que a perda na caldeira é na faixa de 5%. Por outro lado, a análise utilizando o conceito de exergia mostra que cerca de apenas 5% do conteúdo energético do combustível possível de ser convertido em trabalho, ou exergia, é destruído no condensador, sendo que, na caldeira, cerca de 30% do conteúdo energético do combustível possível de ser convertido em trabalho é destruído. Portanto, do ponto de vista termoeconômico, é aconselhável investir mais no desenvolvimento da caldeira do que no condensador, porque é na caldeira onde existe maior possibilidade de incremento na geração de trabalho [4]. Tais resultados são revelados utilizando uma análise exergética convencional do sistema.

Além de verificar quanto de exergia é destruída em cada componente de uma instalação, muitas vezes é desejável saber a parcela dessa destruição que pode ser evitada, além de verificar como a eficiência de um determinado componente é influenciado pelas ineficiências dos demais. Para isso, é realizada uma análise exergética avançada, que permite fragmentar a destruição exergética em parcelas evitáveis/inevitáveis e endógenas/exógenas. Essa divisão permite que se consiga com mais detalhes verificar a performance exergética do sistema, visando facilitar, portanto, a melhoria do mesmo [5].

Inúmeros estudos sobre análise exergética avançada foram realizados nos últimos anos e em diferentes aplicações. FALLAH [6] fez a comparação entre diferentes ciclos abertos de turbina a gás utilizando a análise exergética convencional com o intuito de

determinar o mais eficiente. Em seguida, realizou a análise avançada de maneira a obter o potencial de melhoria dos componentes. Foi possível verificar que a ordem de priorização dos componentes para melhoria do sistema, analisando a destruição exergética e suas parcelas, foi diferente entre a análise convencional e avançada.

GALINDO [7] aplicou a análise exergética avançada em um ciclo orgânico acoplado a um motor de combustão interna utilizando dados experimentais e, a partir da análise, concluiu que existia um alto potencial de melhoria no ciclo, onde poderia reduzir até 36,5% a taxa de destruição de exergia total. FU *et al.* [8] desenvolveram um método de diagnóstico de plantas térmicas para identificar a degradação dos componentes e prevenir o sistema de anomalias, através da análise exergética avançada.

Outra aplicação foi a realizada por BALLI [9] que conduziu uma análise exergética avançada em uma turbina aeronáutica militar. Fazendo tal estudo ele pode perceber que o sistema analisado apresentava pouco potencial de melhoria, porque a taxa de destruição exergética inevitável era muito alta. Além disso a interdependência entre os componentes se mostrou fraca, uma vez que a parcela endógena era elevada. Com a obtenção das parcelas da exergia destruída, pode identificar componentes que deveriam ser priorizados para aumento de desempenho do sistema da turbina.

As análises exergéticas convencional e avançada podem ainda ser combinadas com princípios econômicos para fornecer ao projetista ou operador do sistema térmico informações a respeito dos custos envolvidos na planta. Nesse sentido, a primeira e segunda leis da termodinâmica são combinadas com conceitos econômicos (formando o campo da Exergoeconomia) passando a representar uma ferramenta poderosa para o estudo e otimização de sistemas térmicos [10].

Tem-se observado nos últimos anos um maior interesse nas técnicas de otimização aplicadas a sistemas térmicos. Em geral são aplicadas nos casos em que se deseja a redução de custos de uma planta ou ainda a maximização da sua eficiência [11-12]. Há ainda trabalhos que utilizam as informações da análise exergética como parte de uma rotina de otimização para facilitar a obtenção de pontos ótimos procurados [4].

No campo de otimização, existem inúmeras técnicas matemáticas à disposição, como aquelas baseadas em métodos heurísticos ou determinísticos. As técnicas de otimização utilizando métodos híbridos, que representam uma combinação destes, vem mostrando excelente desempenho devido a inúmeras vantagens que esses métodos apresentam [13].

Apesar dos inúmeros trabalhos publicados na literatura sobre análise exergoeconômica avançada ao longo dos últimos anos, ainda é raro encontrar uma discussão acerca dos resultados da análise exergoeconômica avançada em comparação com a análise exergoeconômica convencional em diferentes condições operacionais de um mesmo sistema térmico, sobretudo analisando condições ótimas e não-ótimas. Nesse sentido, o presente trabalho busca preencher essa lacuna e aprofundar a compreensão nessa seara de conhecimento.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo do presente trabalho é avaliar os resultados da análise exergoeconômica avançada em diferentes condições de operação de um sistema de cogeração e comparar as diferenças em relação a análise exergoeconômica convencional. A análise do sistema térmico escolhido foi feita em três condições de operação: sistema operando em menor custo, sistema operando em máxima eficiência exergética e sistema operando em uma condição definida arbitrariamente. As condições de menor custo e máxima eficiência exergética foram obtidas mediante um processo de otimização matemática via algoritmos híbridos. Com os resultados obtidos, buscou-se avaliar ainda a viabilidade de um algoritmo de otimização integrado a análise avançada no sentido de facilitar o caminho em direção a condição ótima.

## **1.3 Organização do Trabalho**

Como visto, o capítulo 1 se dedica a mostrar o cenário energético atual e a motivação em tratar do tema análise exergoeconômica avançada e otimização de sistemas térmicos. No capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica que serve de base para o presente trabalho. Basicamente nesse capítulo exploram-se os seguintes temas: Análise Exergética Convencional, Análise Exergética Avançada, Análise Exergoeconômica Convencional, Análise Exergoeconômica Avançada e Otimização. Especificamente, na parte de Otimização, discorreu-se acerca dos métodos híbridos que foram utilizados no presente trabalho.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para otimização e análise exergoeconômica avançada utilizada no presente trabalho. Nele discorre-se acerca das premissas para determinação das parcelas evitáveis, inevitáveis, endógenas e exógenas de destruição de exergia, custos de destruição e taxas de investimento dos componentes.

Já o capítulo 4 apresenta o estudo de caso do presente trabalho, o sistema CGAM. Nele descrevem-se as principais características do sistema, seu modelo termodinâmico, seu modelo econômico, além dos critérios para a otimização e para análise exergoeconômica avançada.

No capítulo 5 são apresentados os resultados das análises exergoeconômicas convencional e avançada obtidos e é feita uma comparação do sistema CGAM operando com menor custo, operando com maior eficiência exergética e operando em uma condição arbitrária estabelecida inicialmente. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas com o presente trabalho.

## 2. Revisão Bibliográfica

A seguir serão apresentadas as bases teóricas utilizadas no presente trabalho. Serão apresentadas a análise exergética convencional, a análise exergética avançada, a análise exergoeconômica convencional e a análise exergoeconômica avançada. Também serão apresentados os métodos de otimização utilizados para a obtenção das condições ótimas do sistema térmico analisado.

### 2.1 Análise Exergética Convencional

A exergia pode ser entendida como uma propriedade que quantifica o potencial de uso, basicamente é um parâmetro que mede a qualidade da energia associada a um estado termodinâmico. Exergia também pode ser interpretada como o máximo trabalho teórico possível de ser obtido a partir de um sistema global, composto por um sistema e o ambiente, conforme este sistema entra em equilíbrio com o ambiente, sendo, portanto, uma medida do desvio do estado de um sistema quando comparado ao do ambiente.

Define-se o ambiente como um sistema compressível simples que é grande em extensão e uniforme na temperatura  $T_0$  e pressão  $P_0$ , tomados em condições típicas. Quando um sistema está em equilíbrio em relação ao ambiente, diz-se que o mesmo está em estado morto, portanto não pode haver interação entre o sistema e o ambiente. Desse modo não há potencial para desenvolver trabalho [3]. Matematicamente a exergia por unidade de massa, conhecida como exergia específica, pode ser obtida através da seguinte equação:

$$e = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (1)$$

onde  $u$ ,  $v$ ,  $s$ ,  $V^2/2$  e  $gz$  representam a energia interna específica, o volume, a entropia, a energia cinética e a energia potencial específicos, respectivamente no estado de interesse;  $u_0$ ,  $v_0$ ,  $s_0$  são propriedades específicas no estado morto, a  $T_0$  e  $P_0$ . Portanto, a exergia específica é dada em J/kg.

Deve-se notar que o valor de exergia não pode ser negativo. Qualquer estado termodinâmico que o sistema estiver diferente do estado morto, este será capaz de mudar sua condição espontaneamente na direção do estado morto. Portanto, quando o sistema está no estado morto, ele está em equilíbrio térmico, químico e mecânico com o ambiente e sua exergia tem valor zero.

A exergia pode também ser entendida como o módulo do valor teórico mínimo de fornecimento de trabalho para levar o sistema do estado morto para um determinado estado [14]. Diferentemente da energia, a exergia não é conservada, mas pode ser destruída pelas irreversibilidades presentes no sistema.

Assim como ocorre com a energia, a exergia pode ser transferida através da fronteira de um sistema fechado. É necessário notar que a variação de exergia durante um processo não é necessariamente igual à exergia líquida transferida, porque a exergia pode ser destruída se estiverem presentes irreversibilidades no sistema durante o processo. Os conceitos de variação de exergia, transferência de exergia e destruição de exergia estão relacionados com o balanço de exergia para um sistema fechado, cuja equação é apresentada abaixo.

$$E_2 - E_1 = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta Q - [W - P_0(V_{ol2} - V_{ol1})] - T_0 \sigma \quad (2)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}$   

Variação de Exergia

$\underbrace{\hspace{15em}}$   

Transferência de Exergia

$\underbrace{\hspace{10em}}$   

Destruição de Exergia

ou

$$E_2 - E_1 = E_Q - E_W - E_D \quad (3)$$

Tal balanço pode ser interpretado como a soma de três parcelas. A primeira está relacionada à transferência de calor ( $E_Q$ ) de ou para o sistema durante o processo, portanto, pode ser entendida como a exergia associada ao calor. A segunda pode ser interpretada como a transferência de exergia associada ao trabalho ( $E_W$ ). A última leva em conta a destruição de exergia em virtude das irreversibilidades presentes no sistema ( $E_D$ ). Necessariamente, quando lidamos com processos irreversíveis, a destruição exérgica assumirá um valor positivo, enquanto que, para processos reversíveis, seu valor é igual a zero.

Pode-se considerar no sistema em análise que, em um volume de controle, massas estão entrando e saindo. Nesse caso, pode-se escrever o balanço da taxa de exergia para volume de controle da seguinte maneira:

$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W} - P_0 \frac{dV_{ol}}{dt}\right) + \left(\sum_e \dot{m}_e e_e - \sum_s \dot{m}_s e_s\right) - \dot{E}_D \quad (4)$$

Na equação,  $\frac{dE}{dt}$  representa a taxa temporal de variação de exergia. O primeiro termo  $\left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j$  se refere a taxa temporal de transferência de exergia que acompanha a taxa de transferência de calor que ocorre na fronteira, cuja temperatura instantânea é  $T_j$ .  $\dot{W}$  se refere a taxa de transferência de exergia através do trabalho e  $\frac{dV_{ol}}{dt}$  a variação temporal do volume do sistema, enquanto que  $\dot{E}_D$  se refere à taxa de destruição exergética devido às irreversibilidades do sistema. Os termos  $\dot{m}_e$  e  $\dot{m}_s$  representam as vazões mássicas que entram e saem do volume de controle respectivamente, enquanto que  $e_e$  e  $e_s$  se referem à exergia específica que entram e saem do volume de controle respectivamente. Nesse caso, taxa de exergia tem dimensão de potência, portanto, é dada em Watts.

Em sistemas térmicos é conveniente expressar o balanço exergético analisando as parcelas de exergia associadas ao combustível, aos produtos, às perdas e às destruições de cada um componentes [14]. Em um sistema, esse balanço é dado por:

$$\dot{E}_{F,tot} = \dot{E}_{P,tot} + \dot{E}_{L,tot} + \dot{E}_{D,tot} \quad (5)$$

onde  $\dot{E}_{F,tot}$  é a taxa de exergia para o combustível (*Fuel*),  $\dot{E}_{P,tot}$  para o produto (*Product*),  $\dot{E}_{L,tot}$  para exergia das perdas (*Loss*) e  $\dot{E}_{D,tot}$  para a taxa de exergia destruída (*Destruction*). É importante ressaltar que há uma diferença entre energia perdida (ou rejeitada) e energia destruída. Exergia perdida se refere à exergia rejeitada para a vizinhança, enquanto que exergia destruída é devida às irreversibilidades do sistema [14].

Para avaliar a utilização de recursos energéticos e fornecer uma importante medida da performance de um sistema energético sob o ponto de vista termodinâmico, faz-se uso da eficiência exergética. Basicamente esta indica a porcentagem da exergia do combustível que é encontrada nos produtos. Matematicamente, a eficiência exergética é dada por:

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = 1 - \frac{\dot{E}_D + \dot{E}_L}{\dot{E}_F} \quad (6)$$



Nesse sentido deve-se reconhecer em cada componente o combustível e o produto em questão. O produto deve ser aquele que está relacionado com o propósito de compra e utilização do sistema. Já o combustível representa os recursos gastos para gerar o produto [14]. Por exemplo, em uma turbina sem extração, como o propósito da utilização da mesma é somente gerar energia através da expansão de um gás ou líquido, considera-se a potência gerada ( $\dot{W}$ ) como o produto e o decaimento de exergia entre a entrada e saída como o combustível. Matematicamente, sua eficiência é dada por:

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}}{\dot{E}_2 - \dot{E}_1} \quad (7)$$

Sendo assim, a análise exergética concencional busca identificar e quantificar a exergia dos combustíveis, exergia dos produtos e a exergia destruída de cada componente. Além disso, busca identificar o quanto da exergia disponibilizada para o componente está sendo convertida em produtos.

Como a maioria dos sistemas térmicos é abastecida com influxos de exergia direta ou indiretamente do consumo de combustíveis fósseis, destruições de exergia representam um desperdício desses recursos. Nesse sentido, pode-se reduzir tais ineficiências, através de estratégias para determinar a localização, os tipos e a verdadeira magnitude do desperdício de recursos energéticos em cada componente, garantindo um uso mais eficiente dos combustíveis [14].

## 2.2 Análise Exergética Avançada

Em muitos casos, a simples quantificação da destruição exergética não é suficiente para descrever da melhor maneira o desempenho exergético de sistema térmicos. Por vezes, torna-se interessante fragmentar essa destruição em diferentes parcelas que melhorem a descrição exergética do sistema.

Além de verificar quanto de exergia é destruída, é necessário saber a parcela dessa destruição que pode ser evitada e como a eficiência de um determinado componente é influenciado pelas ineficiências dos demais. Com essa divisão é possível mapear com um maior nível de detalhe os fatores que provocam as destruições exergéticas. Nesse contexto, costuma-se dividir a destruição exergética em evitável e inevitável e destruição exergética endógena e exógena. A seguir serão apresentadas essas parcelas.

### 2.2.1 Destruição Exergética Evitável e Inevitável

Sabe-se que em todos os componentes ocorrem destruições exergéticas, entretanto parte dessas destruições são inevitáveis devido a limitações tecnológicas e/ou econômicas dos próprios equipamentos [15]. Nesse sentido, existe uma parcela da destruição que é inerente ao componente devido a tais restrições e, portanto, não pode ser eliminada, mesmo utilizando-se as melhores tecnologias. A essa parcela é dado o nome de destruição exergética inevitável. O restante se refere à destruição exergética evitável e é a essa parcela que deve ser dada atenção, uma vez que essa é a fração que pode ser revertida melhorando a eficiência do componente, consequentemente do sistema térmico. Supondo um determinado componente  $k$ , a destruição exergética pode ser representada matematicamente como:

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,k}^{AV} + \dot{E}_{D,k}^{UN} \quad (8)$$

onde  $\dot{E}_{D,k}^{UN}$  representa a destruição exergética inevitável, do inglês *Unavoidable*, que não pode ser revertida e  $\dot{E}_{D,k}^{AV}$  se refere a destruição exergética evitável, do inglês *Avoidable*. Para a determinação da parcela inevitável, calcula-se a razão entre a destruição de exergia e a exergia do produto  $\left(\frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_P}\right)$  através da seleção de parâmetros termodinâmicos do componente  $k$  que produzam a menor taxa de destruição de exergia. Portanto, essa razão é calculada considerando que o componente opere em sua melhor condição, ou seja, aquela que produza a menor taxa de destruição com as limitações tecnológicas e econômicas para o presente período. A destruição exergética inevitável de um determinado componente  $k$ , operando em uma condição “A” qualquer, é calculada por:

$$\dot{E}_{D,k,A}^{UN} = \dot{E}_{P,k,A} \left( \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_P} \right)_k^{UN} \quad (9)$$

Em geral, para determinar  $\left(\frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_P}\right)_k^{UN}$  para diferentes componentes, costuma-se considerá-los separadamente. TSATSARONIS *et al.* [16] atentam para o fato de que, embora os dados do fluxo do projeto real (aqueles referentes à condição analisada) sejam utilizados, as temperaturas, as pressões, as vazões mássicas e os principais parâmetros de projeto são ajustados para alcançar o melhor desempenho

termodinâmico. O estado de melhor desempenho é encontrado selecionando os parâmetros termodinâmicos mais importantes do componente e ajustando de maneira a encontrar a melhor eficiência. Não existe um critério único para essa seleção, portanto, ela é realizada de maneira arbitrária e pode ser embasada com a experiência do projetista [16].

Nesse contexto, costuma-se definir uma eficiência exergética modificada  $\varepsilon_k^*$  que considera a destruição de exergia evitável do componente  $k$ . Desconsiderando as perdas de exergia, a eficiência exergética modificada pode ser definida por:

$$\varepsilon_k^* = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k} - \dot{E}_{D,k}^{UN}} = 1 - \frac{\dot{E}_{D,k}^{AV}}{\dot{E}_{F,k} - \dot{E}_{D,k}^{UN}} \quad (10)$$

### 2.2.2 Destruição Exergética Endógena e Exógena

A destruição exergética também pode ser dividida em destruição endógena e exógena. A destruição endógena de um determinado componente se refere à parcela da destruição de exergia que se deve apenas às irreversibilidades daquele componente quando os demais estão operando em condições ideais [15]. Dessa maneira, para ilustrar como as iterações entre os componentes afetam a destruição exergética global do sistema, pode-se analisar o exemplo de um sistema composto por três componentes, A, B e C, conforme ilustrado na Figura 3.

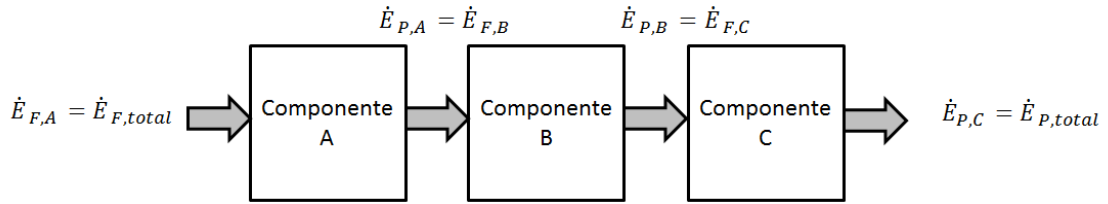


Figura 3. Exemplo de sistema para ilustração.

Para o caso acima, o balanço exergético pode ser escrito como:

$$\dot{E}_{F,total} = \dot{E}_{P,total} + \sum_k \dot{E}_{D,k} + \dot{E}_{L,total} \quad (11)$$

onde:

$$\sum_k \dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,A} + \dot{E}_{D,B} + \dot{E}_{D,C} \quad (12)$$

$$\dot{E}_{L,total} = 0 \quad (13)$$

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (14)$$

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{F,k} - \dot{E}_{P,k} = \dot{E}_{P,k} \left( \frac{1}{\varepsilon_k} - 1 \right) \quad (15)$$

Como visto, é considerado que não há perdas de exergia no sistema [15]. Calculando a exergia destruída em cada componente, teremos inicialmente para C:

$$\dot{E}_{D,C} = \dot{E}_{P,C} \left( \frac{1}{\varepsilon_C} - 1 \right) = \dot{E}_{P,total} \left( \frac{1}{\varepsilon_C} - 1 \right) \quad (16)$$

Como pode-se notar, a destruição exergética do componente C depende apenas das irreversibilidades do componente, onde  $0 < \varepsilon_C < 1$ . Portanto, a destruição exergética endógena é dada por:

$$\dot{E}_{D,C} = \dot{E}_{D,C}^{EN} \quad (17)$$

Como o combustível de C é o produto de B, a destruição exergética para o componentes B é a seguinte:

$$\dot{E}_{D,B} = \dot{E}_{P,B} \left( \frac{1}{\varepsilon_B} - 1 \right) = (\dot{E}_{P,total}/\varepsilon_C) \left( \frac{1}{\varepsilon_B} - 1 \right) \quad (18)$$

Como pode ser visto, a destruição exergética de B depende tanto das irreversibilidades de B quanto de C, onde  $0 < \varepsilon_B < 1$ , uma vez que o produto de B também é o combustível de C. Portanto, para o componente B, existe tanto a componente endógena quanto exógena da destruição de exergia. Se o componente C operasse idealmente  $\varepsilon_C = 1$ , a parcela endógena da destruição de B poderia ser obtida.

Fazendo o mesmo raciocínio para o componente A, tem-se:

$$\dot{E}_{D,A} = \dot{E}_{P,A} \left( \frac{1}{\varepsilon_B} - 1 \right) = \left( \frac{\dot{E}_{P,total}}{\varepsilon_B \varepsilon_C} \right) \left( \frac{1}{\varepsilon_B} - 1 \right) \quad (19)$$

Da mesma maneira, consegue-se observar que a destruição exergética de A depende das eficiências de A, B e C, onde  $0 < \varepsilon_C < 1$ . Caso os componente B e C operassem idealmente, ou seja,  $\varepsilon_B = \varepsilon_C = 1$  a parcela endógena da destruição de A poderia ser obtida.

Sendo assim, todas as vezes em que a destruição exergética de um componente depender das irreversibilidades de outros componentes de um sistema, poder-se-á dividir essa destruição em componentes endógenas e exógenas. Nesse contexto, existem inúmeras técnicas para o cálculo da destruição endógena, dentre as quais: Método Baseado em Ciclos Termodinâmicos [17-18], Método do Balanço Exergético [17], Método do Componente Equivalente [17], Método baseado na Teoria estrutural e análise de funcionamento defeituoso [19] e Método de Engenharia (ou Método do Gráfico) [15-17]. No presente trabalho, optou-se por utilizar o Método do Gráfico, uma vez que para ele não é necessário que se conheça o funcionamento ideal de todos os componentes, apenas a determinação de alguns pontos de operação, variando-se a eficiência de seus componentes.

O método foi desenvolvido por TSATSARONIS [20] e é apresentado a seguir. Toma-se como base o mesmo sistema descrito na Figura 3. Supondo que o mesmo opere de maneira ideal (identificado pelo sobrescrito ID) e que não possua irreversibilidade em nenhum dos componente, o balanço exergético do sistema todo pode ser definido como:

$$\dot{E}_F^{ID} = \dot{E}_P \quad (20)$$

Se passarmos a considerar uma irreversibilidade somente no componente  $k$ , uma quantidade adicional de combustível será fornecida para suprir a destruição de exergia desse componente. Portanto o balanço do sistema será reescrito da seguinte forma:

$$(\dot{E}_F^{ID} + \Delta\dot{E}_{F,k}) = \dot{E}_P + \dot{E}_{D,k}^{EN} \quad (21)$$

Como a única destruição de exergia presente no sistema é devida ao componente  $k$ , essa destruição é equivalente a destruição endógena de  $k$ . Considerando agora um sistema real, indicado pelo sobrescrito RE, onde todos os componentes terão irreversibilidades, o balanço exergético pode ser escrito como:

$$(\dot{E}_F^{ID} + \Delta\dot{E}_F^{RE}) = \dot{E}_P + \dot{E}_{D,outros} + \dot{E}_{D,k} \quad (22)$$

onde  $\Delta\dot{E}_F^{RE}$  representa o aumento de combustível devido às irreversibilidades acarretadas pelo funcionamento real do sistema ( $\epsilon < 1$ ) de todos os componentes.

Pode-se portanto fazer a destruição exergética dos outros componentes tender a zero, nesse caso:

$$\begin{aligned} (\dot{E}_F^{ID} + \Delta\dot{E}_F^{RE}) &\rightarrow (\dot{E}_F^{ID} + \Delta\dot{E}_F^k) \\ \dot{E}_{D,k}^{EN} &\rightarrow \dot{E}_{D,k} \end{aligned}$$

Portanto, para se obter a parcela de destruição endógena de um determinado componente, deve-se plotar:

$$(\dot{E}_F^{ID} + \Delta\dot{E}_F^{RE}) - \dot{E}_P \text{ vs } \dot{E}_{D,outros}$$

onde o valor de  $\dot{E}_{D,k}^{EN}$  será obtido no ponto em que  $\dot{E}_{D,outros} = 0$ , ou seja, onde a reta do gráfico interceptar a ordenada, conforme ilustrado na Figura 4.

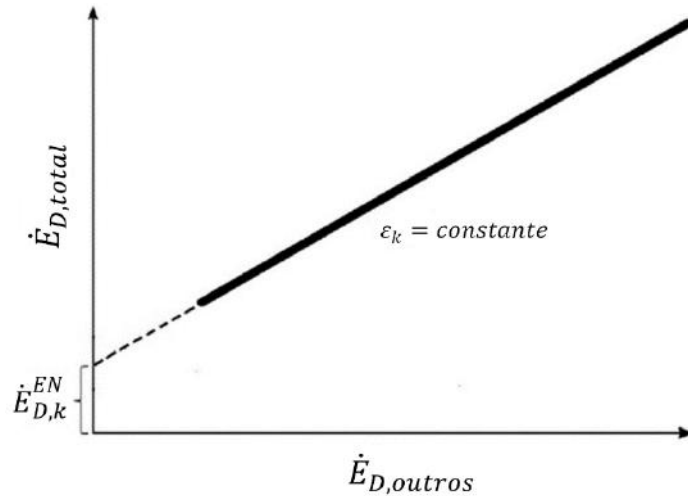


Figura 4. Determinação da Parcela Endógena pelo Método de Engenharia.

Dessa forma, para obter o valor de destruição exergética endógena de um determinado componente, não é necessário saber quais valores deveriam ser adotados para os parâmetros de cada componente de maneira que eles operassem idealmente [20]. A variação da resposta exergética do sistema no sentido da redução das destruições de exergia nos  $k - 1$  componentes é suficiente para realizar a regressão linear do gráfico e, a partir dele, conhecer a interseção com a ordenada. Deve-se ficar atento apenas ao fato de que a eficiência exergética do componente sob análise mantenha-se constante a medida que  $\dot{E}_{D,outros}$  varia. Para sistemas grandes e complexos, é melhor concentrar-se nos componentes com maior taxa de destruição de exergia [19].

### 2.3 Análise Exergoeconômica Convencional

Todo projeto e operação de um sistema térmico envolve a aplicação de princípios termodinâmicos, mecânica dos fluidos e transferência de calor, além de campos como materiais, fabricação e projeto mecânico. Além disso, o projeto desses sistemas também contemplam fatores econômicos, já que os custos sempre são um fator importante a ser considerado. Essa análise de custos visa objetivamente aplicar no mundo real a experiência de avaliação de custo no projeto de engenharia e gerenciamento de projeto [3]. Nesse contexto, surge o campo da Exergoeconomia que busca combinar a exergia e economia para estudos de otimização durante o projeto de novos sistemas e melhorias dos projetos já existentes.

A análise exergoeconômica busca combinar a análise exérgica com princípios econômicos para fornecer informações não disponíveis por meio de uma análise energética/econômica convencional. Dessa forma, o objetivo é calcular separadamente os custos de cada produto gerado pelo sistema, permitir a compreensão dos processos de formação de custos (ou fluxos de custos) e facilitar a otimização de variáveis associadas a um sistema térmico.

Para realizar a análise exergoeconômica, combina-se os balanços de massa, energia e exergia com o balanço de custo. Considerando um determinado componente  $k$  de um sistema, o balanço de custo pode ser calculado pela equação abaixo [14]:

$$\sum_P \dot{C}_{P,k} = \sum_F \dot{C}_{F,k} + \dot{Z}_k - \sum_L \dot{C}_{L,k} \quad (23)$$

onde  $\dot{C}_{P,k}$ ,  $\dot{C}_{F,k}$  e  $\dot{C}_{L,k}$  representam as taxas de custos associadas ao produto, ao combustível e às perdas respectivamente, enquanto que  $\dot{Z}_k$  representa os custos associados ao investimento, operação e manutenção do sistema. Portanto o custo associado ao produto de um componente é igual a soma do custo do insumo (combustível) e do investimento de capital, operação e manutenção do componente, subtraído dos custos das perdas. Em geral, na abordagem feita para um componente, considera-se que a taxa de custos associada às perdas como sendo zero [14]. Dado que em um sistema térmico podem haver fluxos de matéria entrando e saindo de um volume de controle e, associados a esses fluxos de massa, ocorrem fluxos de exergia para dentro e para fora do sistema, cada custo em um sistema térmico está associado a um fluxo de

exergia. Para isso, costuma-se indicar o custo relativo a um determinado fluxo ‘ $i$ ’ da seguinte maneira:

$$\dot{C}_i = c_i \dot{E}_i \quad (24)$$

onde  $\dot{C}_i$  é a taxa de custo associado ao fluxo  $i$ ,  $\dot{E}_i$  o fluxo de exergia de  $i$  e  $c_i$  é o custo médio por unidade de exergia da  $i$ -ésima corrente.

A definição dos combustíveis e produtos de cada componente é feita segundo os critérios definidos por LAZZARETO e TSATSARONIS [21]. Nesse método, o produto de um determinado componente são todos os fluxos de exergia na saída do componente não associados a fluxos de massa ou todos os incrementos de exergia entre entrada e saída dos fluxos de exergia do componente associados a fluxos de massa. Já os combustíveis consistem de todos os fluxos de exergia na entrada do componente não associados a fluxos de massa ou todos os decrementos de exergia entre entrada e saída dos fluxos de exergia do componente associados a fluxos de massa.

Para um determinado componente é suposto que se conhecem todos os custos de entrada. Supondo que esse mesmo componente tenha  $N_e$  fluxos de saída, são necessário  $N_e - 1$  equações auxiliares para resolver o sistema, uma vez que a única equação conhecida até o momento é a equação de balanço de custo. Essas equações auxiliares são obtidas considerando que os custos de fornecimento de exergia é o mesmo para todos os produtos do componentes. Já para o combustível, considera-se que o custo médio de remoção de exergia é igual ao custo específico com que esse fluxo é suprido pelos componentes anteriores. Dessa forma, o número de equações do problema se torna igual ao número de variáveis, tornando possível a obtenção de todas as  $N_e$  incógnitas.

LOZANO e VALERO [22] desenvolveram uma forma sistemática facilmente implementada computacionalmente que envolve operações com matrizes de incidência ( $A$ ), tanto para os combustíveis quanto para os produtos. Essas matrizes indicam as interligações entre os componentes e os fluxos do sistema. O número de linhas das matrizes está relacionado ao número de componentes e o número de colunas, com os fluxos do sistema. Para o fluxo da coluna  $j$ , o elemento de linha  $i$  pode receber o valor de 0, 1 ou -1, indicando que o fluxo  $j$  está ou não está conectado, ou entra ou sai do componente  $i$ , respectivamente.

Para a matriz de produtos são considerados apenas os fluxos relacionados ao produtos, enquanto que para a matriz dos combustíveis são considerados apenas os



fluxos relacionados ao combustível. Considerando  $NK$  o número de componentes,  $m$  o número de fluxos, os fluxos de exergia relacionados ao produto,  $\dot{E}_P$ , e ao combustível,  $\dot{E}_F$ , são dados por:

$$A_P \dot{E} = \dot{E}_P \quad (25)$$

$$A_F \dot{E} = \dot{E}_F \quad (26)$$

onde  $A_P$  e  $A_F$  são, respectivamente, as matrizes de incidência dos produtos e dos combustíveis. Já  $\dot{E}$  é o vetor fluxo de exergia que é obtido com a simulação do sistema térmico e contém os valores de exergia para cada fluxo.  $\dot{E}_P$  e  $\dot{E}_F$  representam os vetores fluxos de exergia dos produtos e dos combustíveis e tem dimensão  $NK \times 1$ . A partir dessas matrizes, pode-se obter a matriz custo do sistema ( $\hat{A}$ ), de dimensão  $m \times m$ , em que as  $NK$  primeiras linhas são as mesmas da matriz de incidência  $A$ . Portanto essas equações podem ser representadas de maneira matricial da seguinte forma:

$$\hat{A} \dot{C} = Z \quad (27)$$

onde  $Z$  é o vetor custos horários do sistema. Os primeiros  $NK$  elementos estão relacionados aos custos por unidade de tempo associados ao investimento de capital na aquisição de cada componente acrescido dos custos de operação e manutenção. Os elementos seguintes são associados aos custos por unidade de tempo dos fluxos de entrada do sistema. Já os demais são nulos. Matricialmente, o vetor é indicado por.

$$\dot{C} = \begin{bmatrix} \dot{C}_1 \\ \vdots \\ \dot{C}_m \end{bmatrix}$$

Portanto o vetor de custos exergéticos,  $\dot{C}$ , pode ser obtido resolvendo:

$$\dot{C} = \hat{A}^{-1} Z \quad (28)$$

Já os vetores de custo exergético horário dos produtos e combustíveis,  $\dot{C}_P$  e  $\dot{C}_F$ , respectivamente, são dados por:

$$A_P \dot{C} = \dot{C}_P \quad (29)$$

$$A_F \dot{C} = \dot{C}_F \quad (30)$$

Os custos médios por unidade de exergia dos produtos e dos combustíveis de cada componente são determinados por:

$$c_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}} \quad (31)$$

$$c_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (32)$$

Já os custos de destruição são calculados por:

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \dot{E}_{D,k} \quad (33)$$

Costuma-se utilizar outras variáveis exergoeconômicas para caracterizar um determinado componente, dentre as quais: a razão de destruição de exergia, o fator exergoeconômico e a diferença relativa de custos. A razão de destruição de exergia é dada por:

$$\dot{y}_{D,k}^* = \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{D,total}} \quad (34)$$

O fator exergoeconômico é expresso por:

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{F,k}(\dot{E}_{D,k} + \dot{E}_{L,k})} \quad (35)$$

A diferença relativa de custos é representada por:

$$r_k = \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}} \quad (36)$$

## 2.4 Análise Exergoeconômica Avançada

A análise exergoeconômica avançada compreende, além da análise exergoeconômica convencional e da análise exérgica avançada, a partição dos custos de destruição e as taxas de investimento em parcelas evitável e inevitável, endógena e exógena. A seguir serão apresentadas as equações para o cálculo de cada uma dessas parcelas.

### 2.4.1 Custos de Destruição Evitável/Inevitável e Endógeno/Exógeno

Os custos de destruição podem ser divididos em parcelas evitáveis e inevitáveis com o intuito de indicar qual o potencial de melhoria do componente dada às limitações tecnológicas do período, como também em parcelas endógenas e exógenas a fim de mostrar quanto de exergia destruída é devido somente as irreversibilidades do componente ou devido a ineficiência dos demais [15]. Sabendo-se os custos específicos de combustíveis, é possível determinar essas parcelas através das seguintes equações.

$$\dot{C}_{D,k}^{EN} = c_{F,k} \dot{E}_{D,k}^{EN} \quad (37)$$

$$\dot{C}_{D,k}^{EX} = \dot{C}_{D,k}^{Real} - \dot{C}_{D,k}^{EN} \quad (38)$$

$$\dot{C}_{D,k}^{UN} = c_{F,k} \dot{E}_{D,k}^{UN} \quad (39)$$

$$\dot{C}_{D,k}^{AV} = \dot{C}_{D,k}^{Real} - \dot{C}_{D,k}^{UN} \quad (40)$$

### 2.4.2 Taxas de Investimento Evitável/Inevitável e Endógeno/Exógeno

Assim como para os custos de destruição, as taxas de investimento também podem ser divididas em parcelas evitáveis/inevitáveis, endógenas/exógenas com o mesmo intuito, só que agora associado às taxas de investimento. A seguir são apresentadas as equações para o cálculo de cada um das parcelas.

$$\dot{Z}_k^{EN} = \dot{E}_{P,k}^{EN} \left( \frac{\dot{Z}}{\dot{E}_P} \right)_k^{Real} \quad (41)$$

$$\dot{Z}_k^{EX} = \dot{Z}_k^{Real} - \dot{Z}_k^{EN} \quad (42)$$

$$\dot{Z}_k^{UN} = \dot{E}_{P,k} \left( \frac{\dot{Z}}{\dot{E}_P} \right)_k^{UN} \quad (43)$$

$$\dot{Z}_k^{AV} = \dot{Z}_k^{Real} - \dot{Z}_k^{UN} \quad (44)$$

Como visto, para se obter a parcela endógena da taxa investimento, é necessário que se obtenha  $\dot{E}_{P,k}^{EN}$ , que representa a taxa de exergia dos produtos do componente  $k$  quando todos os demais componentes operam teoricamente [23]. Tal parcela é obtida quando se aproxima o comportamento de todos os demais componentes para o ideal e se calcula a exergia dos produtos para o componente  $k$ . Em seguida, calcula-se  $\left(\frac{\dot{Z}}{\dot{E}_P}\right)_k^{Real}$  para o sistema operando na condição real analisada.

Já para a parcela inevitável do investimento, deve-se calcular a razão da taxa investimento com a exergia dos produtos  $\left(\frac{\dot{Z}}{\dot{E}_P}\right)_k^{UN}$ , escolhendo as variáveis termodinâmicas considerando a versão mais ineficiente do componente. Esse investimento representa o menor valor de taxa de investimento a ser desembolsado, uma vez que será relativo a compra do componente com menor desempenho. Assim como no cálculo da destruição exergética inevitável, a escolha dessas variáveis é feita de maneira arbitrária, podendo ser orientada pela experiência do projetista [16].

## 2.5 Otimização

Otimização é a área de estudo que lida com a maximização ou minimização de uma certa função objetivo ou custo, de modo a encontrar as variáveis que estão de acordo com as restrições do projeto. A função objetivo ( $U$ ) é a função de interesse a ser minimizada ou maximizada, enquanto que as variáveis ( $X$ ) de projeto são aquelas que temos interesse em modificar de maneira a achar o mínimo ou máximo da função. Todo processo de otimização está sujeito a certas restrições de projeto ( $G(x)$ ), devido a limitações técnicas ou econômicas (ex.: peso de uma estrutura, custo dos materiais etc.).

$$U = U(X)$$

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

$$G = G(x) = \alpha \text{ ou } G = G(x) \leq \alpha$$

Em geral, os métodos de otimização se dividem em métodos determinísticos e métodos heurísticos. Os métodos determinísticos visam estabelecer um processo iterativo envolvendo um gradiente, que, depois de um certo número de iterações, venha

a convergir ao mínimo da função objetivo. O procedimento iterativo desse tipo de método pode ser escrito na forma geral seguinte:

$$x^{k+1} = x^k + \alpha^k d^k \quad (45)$$

onde  $x$  é o vetor de variáveis,  $\alpha$  o tamanho do passo,  $d$  a direção de descida e  $k$  é o número da iteração. O melhor que se pode esperar de qualquer método determinístico gradiente é sua convergência para um ponto estacionário, em geral um mínimo local.

Já os métodos heurísticos, em oposição aos métodos determinísticos, não fazem uso do gradiente da função objetivo como uma direção de descida. Eles tendem a imitar a natureza, a fim de encontrar o mínimo da função objetivo, por selecionar, de uma forma elegante e organizada, os pontos onde tal função vai ser calculada [24].

Os métodos híbridos são uma combinação dos métodos determinísticos e dos métodos heurístico, com o intuito de manter a vantagem de cada um. Os métodos híbridos normalmente utilizam um método heurístico para localizar a região onde o mínimo global se encontra. Após determinada essa região, o algoritmo da formulação híbrida muda para um método determinístico para chegar mais próximo e mais rápido ao ponto mínimo.

Normalmente a abordagem mais comum para a utilização dessa formulação é aquela em que se utiliza o método heurístico para gerar boas candidatas a uma solução ótima para, em seguida, transformar essas soluções em mínimos locais. Além disso, existem abordagens em que o método heurístico é realimentado, ou seja, pode alternar inúmeras vezes até que o critério de parada do algoritmo seja atingido.

Observa-se um número crescente de publicações durante a última década relacionadas a formulações híbridas para otimização. JOURDAN *et al.* [25] apresentam um levantamento e classificação de várias abordagens encontradas na literatura, conforme indicado na Figura 5, que fazem uso de algoritmos híbridos. Tal análise valida o interesse crescente que este assunto vem despertando na comunidade científica.

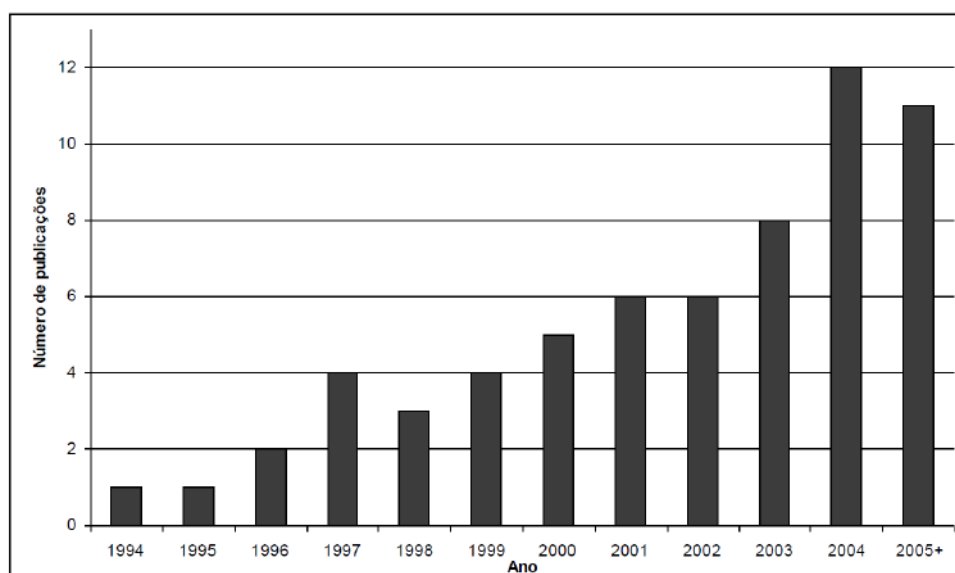


Figura 5. Evolução das publicações envolvendo métodos Híbridos [25].

Inúmeros trabalhos têm sido publicados ao longo dos últimos anos mostrando a eficiência e eficácia das formulações híbridas. NERY e ROLNIK (2007) fizeram uma comparação entre a aplicação pura de um método heurístico (recozimento simulado) com duas formulações híbridas (recozimento simulado com gradiente conjugado e recozimento simulado com método de inclinação máxima). Pôde-se constatar que os métodos híbridos tiveram desempenho superior ao método do recozimento simulado puro, alcançando respostas mais precisas. Tal resultado apontou para a potencialidade dos métodos híbridos, sobretudo em funções complexas.

A prática tem mostrado que as formulações híbridas apresentam bons resultados em diferentes aplicações. ZADEH *et al.* [26] utilizaram um método híbrido, composto de algoritmo genético e programação quadrática sequencial, em um sistema de coletor solar parabólico usando nanofluidos. No problema analisado, apesar de ser não convexo, não-linear e custoso computacionalmente, o método híbrido se mostrou uma boa ferramenta para ser utilizada em sua metodologia.

DOMINKOVIC *et al.* [27] aplicaram uma otimização utilizando método híbrido em um sistema de trigerção, utilizando biomassa, e acoplado com um armazenador de energia térmica subterrâneo. A função objetivo utilizada foi o valor presente líquido (VPL) do sistema. Os resultados utilizando o método foram satisfatórios, indicando que o armazenador de energia se mostra uma excelente opção para projetos de energia renovável.

Sendo assim, diante das inúmeras vantagens supracitadas dos métodos híbridos, no presente trabalho serão utilizadas as formulações híbridas para realizar as otimizações do sistema térmico estudado. A seguir são apresentados brevemente os métodos determinísticos e heurísticos utilizados para compor os métodos híbridos do presente trabalho, indicados em COLAÇO *et al.* [24].

- Gradiente Conjugado

O método do gradiente conjugado melhora a taxa de convergência do método SteepestDescent, escolhendo direções de descida que são uma combinação linear da direção do gradiente com as direções de descida de iterações anteriores. Sendo assim, suas equações são:

$$x^{k+1} = x^k + \alpha^k d^k \quad (46)$$

$$d^k = -\nabla(x^k) + \gamma^k d^{k-1} \quad (47)$$

onde  $\alpha$  o tamanho do passo e  $\gamma$  é o coeficiente de conjugação que atua ajustando o tamanho dos vetores. Diferentes versões do método podem ser encontradas na literatura. Na versão de Fletcher-Reeves, o coeficiente de conjugação é dado por:

$$\gamma^k = \frac{\|-\nabla(x^k)\|^2}{\|-\nabla(x^{k-1})\|^2} \quad (48)$$

- Método de Newton

Enquanto os métodos Steepest Descent e do Gradiente Conjugado usam informações da derivada primeira, o método de Newton também utiliza as informações das derivadas segundas para acelerar a convergência do processo iterativo. O algoritmo utilizado nesse método é apresentado abaixo.

$$x^{k+1} = x^k + d^k \quad (49)$$

$$d^k = -[H(x)]^{-1} \nabla U(x^k) \quad (50)$$

onde  $H(x)$  é o Hessiano da função. Em geral, esse método requer poucas iterações para convergir, entretanto, necessita de uma matriz que cresce com a dimensão do problema.

Se a estimativa estiver longe do mínimo a matriz do Hessiano pode ficar mal condicionada. Além disso, o método envolve a inversão de uma matriz, o que torna a método ainda mais caro computacionalmente.

- Método BFGS

É um tipo dos métodos Quasi-Newton. Esse método procura aproximar a inversa do Hessiano usando informações do gradiente da função. Essa aproximação é feita de tal forma que não envolva derivadas segundas. Dessa forma, esse método tem uma taxa de convergência mais lenta do que os Métodos de Newton, embora seja computacionalmente mais rápido. O algoritmo é apresentado a seguir.

$$x^{k+1} = x^k + \alpha^k d^k \quad (51)$$

$$d^k = -H^k \nabla U(x^k) \quad (52)$$

$$H^k = H^{k-1} + M^{k-1} + N^{k-1} \quad (53)$$

$$M^{k-1} = \left[ 1 + \frac{(Y^{k-1})^T \cdot H^{k-1} \cdot Y^{k-1}}{(Y^{k-1})^T \cdot d^{k-1}} \right] \frac{d^{k-1} \cdot (d^{k-1})^T}{(d^{k-1})^T \cdot Y^{k-1}} \quad (54)$$

$$N^{k-1} = - \left[ \frac{d^{k-1} \cdot (Y^{k-1})^T \cdot H^{k-1} + H^{k-1} \cdot Y^{k-1} (d^{k-1})^T}{(d^{k-1})^T} \right] \quad (55)$$

$$Y^{k-1} = \nabla U(x^k) - \nabla U(x^{k-1}) \quad (56)$$

- Evolução Diferenciada

O método da evolução diferenciada é baseado na Teoria da Evolução das Espécies de Darwin. Seguindo a teoria, os indivíduos mais fortes de uma população seriam mais capazes de sobreviver em certas condições ambientais. O processo iterativo do método é apresentado abaixo.

$$x_i^{k+1} = \delta_1 x_i^k + \delta_2 [\alpha + F(\beta - \gamma)] \quad (57)$$



onde  $x_i$  é o  $i$ ésimo vetor de parâmetros,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são três indivíduos da população representada por uma matriz  $P$ ,  $F$  é a função peso, que influencia a mutação ( $0.5 < F < 1$ ),  $k$  é o número de iterações e  $\delta_1$  e  $\delta_2$  são deltas de Dirac que definem a mutação. No processo de  $U(x_i^{k+1}) < U(x_i^k)$ ,  $x_i^{k+1}$  substitui  $x_i^k$  na população da matriz  $P$ , caso contrário  $x_i^k$  é mantido. O crossover (operador genético) binomial é dado por:

$$\delta_1 = \{0, \text{se } R < CR \text{ e } 1 \text{ se } R > CR\}$$

$$\delta_2 = \{1, \text{se } R < CR \text{ e } 0 \text{ se } R > CR\}$$

onde  $CR$  é o fator que define o crossover ( $0.5 < CR < 1$ ) e  $R$  é um número aleatório sorteado a cada crossover com distribuição uniforme entre 0 e 1.

- Enxame de Partículas

O método de Enxame de Partículas foi criado em 1995 por um engenheiro elétrico e um psicólogo social como um método alternativo ao algoritmo genético. Esse método é baseado no comportamento social de várias espécies e tenta equilibrar a individualidade e a sociabilidade dos indivíduos de maneira a selecionar o ponto ótimo de interesse. O processo iterativo é apresentado abaixo.

$$x_i^{k+1} = x_i^k + V_i^{k+1} \quad (58)$$

$$V_i^{k+1} = \alpha V_i^k + \beta r_{1i}(p_i - x_i^k) + \beta r_{2i}(p_g - x_i^k) \quad (59)$$

onde  $x_i$  é o  $i$ ésimo vetor de parâmetros,  $V_i = 0$  para  $k = 0$ ,  $r_{1i}$  e  $r_{2i}$  são números aleatórios com distribuição uniforme entre 0 e 1,  $p_i$  é o melhor valor encontrado para o vetor  $x_i$  e  $p_g$  é o melhor valor encontrado para toda população,  $0 < \alpha < 1$  e  $1 < \beta < 2$ . Na equação de  $V_i^{k+1}$ , o segundo termo representa a individualidade e o terceiro a sociabilidade.

### 3. Metodologia

O principal objetivo do presente trabalho é comparar os resultados das análises exergoeconômicas avançada e convencional em diferentes condições operacionais de um sistema térmico de cogeração. As condições escolhidas foram as seguintes: condição de menor custo (Ponto Econômico), condição de maior eficiência exergética (Ponto Eficiência) e uma condição tomada arbitrariamente (Ponto Arbitrário). A determinação das condições de menor custo e de maior eficiência exergética são encontradas mediante um processo de otimização. Uma vez definido tais pontos, prossegue-se para a análise exergoeconômica avançada que envolve, além da análise exergoeconômica convencional, a determinação das parcelas de destruição, taxas de investimento e custos de destruição evitáveis, inevitáveis, endógenos e exógenos do sistema nessas condições. Este capítulo dedica-se a apresentar as metodologias adotadas para a otimização e a análise exergoeconômica avançada.

#### 3.1 Metodologia de Otimização

Para encontrar a condição de menor custo e de maior eficiência, recorreu-se aos métodos de otimização híbridos, devido as vantagens desses métodos apresentadas na seção 2.5. Tais métodos de otimização visam maximizar/minimizar a função objetivo do problema que depende das variáveis termodinâmicas do sistema térmico. Para resolver as equações termodinâmicas do problema, adotou-se o simulador de processo profissional IPSEpro versão 6.0. O IPSEpro é um simulador de processo utilizado para modelar e simular diferentes sistemas térmicos, através de seus equacionamentos termodinâmicos. Esse programa foi desenvolvido pela empresa SimTech e apresenta uma interface amigável, além de uma biblioteca composta por uma variedade grande de componentes, permitindo ao usuário modelar e simular plantas convencionais, sistemas de cogeração, ciclos de refrigeração, ciclos combinados entre outros.

Basicamente, o IPSEpro é composto por dois módulos, o PSE (*Process Simulation Environment*) e o MDK (*Model Development Kit*). O PSE é o módulo destinado a construção e simulação de sistemas térmicos, permitindo ao usuário escolher os componentes que deseja utilizar e modelar a planta térmica de interesse. Já o MDK é o módulo que permite a construção de novos componentes que não se encontram nas bibliotecas convencionais ou mesmo a alteração das bibliotecas já

existentes, seja para incluir novos componentes ou mesmo o cálculo de outras variáveis termodinâmicas. Como o presente trabalho envolve o cálculo de exergia, utilizou-se uma biblioteca que contemplasse esse cálculo em cada componente.

As rotinas dos métodos de otimização foram escritas em Matlab® (MathWorks Inc.). Para que o código fosse capaz de coletar os resultados obtidos com o IPSEpro, fez-se necessário o uso de sintaxes específicas para permitir uma integração entre ambos programas. Para otimizar as funções objetivo foram utilizadas seis rotinas de otimização com métodos híbridos. A Tabela 1 indica os métodos Heurísticos e Determinísticos utilizados em cada método híbrido.

Tabela 1. Métodos Híbridos utilizados.

	<i>Heurístico</i>	<i>Determinístico</i>
<b>Híbrido 1</b>	Enxame de Partículas	Gradiente Conjugado
<b>Híbrido 2</b>	Enxame de Partículas	Quasi-Newton
<b>Híbrido 3</b>	Enxame de Partículas	Newton
<b>Híbrido 4</b>	Evolução Diferenciada	Gradiente Conjugado
<b>Híbrido 5</b>	Evolução Diferenciada	Quasi-Newton
<b>Híbrido 6</b>	Evolução Diferenciada	Newton

Para a obtenção da condição de menor custo, a função custo foi minimizada e para a obtenção da condição de maior eficiência exergética, a função eficiência foi maximizada. Em ambos os casos, as respectivas funções objetivo do problema foram otimizadas por cada método híbrido, obtendo-se candidatos ao mínimo para a condição de menor custo e candidatos a máximo para a condição de maior eficiência. Na minimização da função custo, o menor dentre todos os métodos foi escolhido como a condição de menor custo. Já para a maximização da função eficiência, o maior valor dentre todos os métodos foi escolhido como a condição de maior eficiência.

No início dos métodos de otimização são estabelecidos os critérios de otimização escolhidos, como o número de indivíduos da população e o número de iterações de cada método. Uma vez determinado esses parâmetros, inicia-se a rotina de otimização propriamente, onde as variáveis termodinâmicas são fornecidas ao IPSEpro para, em seguida, rodar a simulação e ler os resultados termodinâmicos obtidos. Na sequência, a função objetivo é calculada e verifica-se se o critério de parada do algoritmo foi atingido. Caso não seja atingido, o programa altera a população, segundo o algoritmo do método e dá prosseguimento à rotina. Caso esse critério seja atendido, o programa

encerra e fornece o ponto de interesse. É válido ressaltar que nos casos em que ocorrem erros de simulação no IPSEpro para os valores das variáveis fornecidas, a função objetivo foi penalizada de maneira que a solução se afastasse desses pontos. A Figura 6 ilustra o fluxograma do programa de otimização

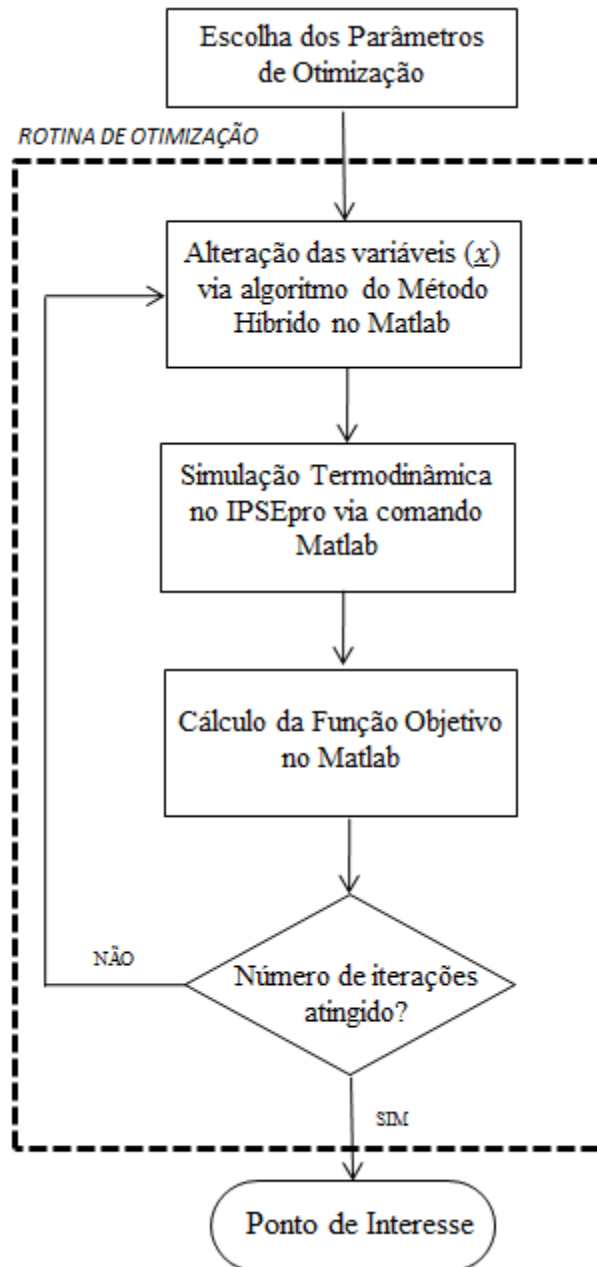


Figura 6. Fluxograma do programa de otimização.

### 3.2 Metodologia de Análise Exergoeconômica Avançada

A análise exergoeconômica avançada envolve, além da análise exergoeconômica convencional, a determinação das destruições exérgicas dos componentes, dos custos

de destruição e das taxas de investimento, todos divididos em parcelas evitáveis, inevitáveis, endógenas e exógenas.

A determinação das destruições exergéticas dos componentes é feita multiplicando-se o vetor exergia das correntes pela matriz de combustível e pela matriz de produtos, para obter a exergia dos combustíveis e dos produtos, respectivamente. A diferença entre ambas fornecerá a destruição exergética de cada componente, conforme equações (25) e (26).

Como visto, a determinação das parcelas evitáveis e inevitáveis da destruição de exergia em cada componente envolve inicialmente o cálculo da razão entre a destruição de exergia e a exergia do produto  $\left(\frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_P}\right)$  através da seleção dos principais parâmetros termodinâmicos de cada componente que produza a menor taxa de destruição de exergia, ou seja, que represente a melhor eficiência exergética, levando-se em conta as limitações tecnológicas e econômicas atuais. Para selecionar os parâmetros termodinâmicos que fornecessem uma melhor eficiência, assim como os valores atribuídos a eles, utilizou-se como base os trabalhos de KELLY [15] e TSATSARONIS [16], além de análises no simulador IPSEpro. Dessa maneira, cada componente foi simulado isoladamente, os parâmetros termodinâmicos escolhidos foram alterados e a razão entre a destruição de exergia e a exergia do produto foi obtida. Utilizando-se as equações (8) e (9), pode-se obter os valores das destruições de exergia evitáveis e inevitáveis.

Para a determinação das parcelas endógenas e exógenas da destruição exergética de cada componente, fez-se uso do Método de Engenharia, conforme descrito em maior detalhe no item 2.2.2. Para a determinação dos pontos do gráfico, o sistema térmico foi simulado no IPSEpro mantendo-se constante a eficiência exergética do componente de interesse e variando-se as eficiências dos demais. A partir desse procedimento, a reta do gráfico foi determinada e foi verificado o ponto da reta que intercepta o eixo das ordenadas, que está relacionado a parcela endógena de destruição. Subtraindo-se a parcela endógena do total da exergia destruída, obteve-se a parcela exógena.

Para a determinação dos custos exergéticos por corrente, determinou-se inicialmente a Matriz Custo do sistema ( $\hat{A}$ ) para o sistema térmico analisado, cuja construção é apresentada na seção 2.3, assim como o vetor dos custos horário ( $\hat{Z}$ ). A partir da equação (28) pode-se chegar ao vetor de custos exergéticos por corrente.

Determinando-se a matriz de produtos e matriz de combustíveis do sistema e utilizando-se as equações (29), (30), (31) e (32), pôde-se determinar os vetores custos exergético dos combustíveis, custo exergético dos produtos, bem como os custos exergéticos por unidade de exergia dos produtos e custos por unidade de exergia dos combustíveis para cada componente. Já os custos exergéticos de destruição são obtidos pela equação (33).

Como visto na seção 2.4.1, para a determinação das parcelas evitáveis/inevitáveis e endógenas/exógenas dos custos de destruição, sabendo-se os custos específicos de combustíveis, as equações (37), (38), (39) e (40) são utilizadas.

Como apresentado na seção 2.4.2, a parcela inevitável da taxa de investimento envolve o cálculo da razão do investimento com a exergia dos produtos  $\left(\frac{\dot{Z}}{\dot{E}_P}\right)_k^{UN}$  escolhendo as variáveis termodinâmicas considerando a versão mais ineficiente do componente. O procedimento para a determinação dessa razão é semelhante ao utilizado no cálculo da parcela inevitável da destruição. A diferença, no entanto, é que o valor atribuído as variáveis termodinâmicas do componente escolhido deve ser de tal forma que sua eficiência seja a menor. Sendo assim, os componentes também foram simulados isoladamente e as variáveis termodinâmica e seus valores foram escolhidos com base nas mesmas referências bibliográficas e análises no simulador IPSEpro. A partir da equação (44), pode-se obter a parcela evitável da taxa de investimento.

Já para a parcela endógena da taxa investimento, é necessário que se obtenha  $\dot{E}_{P,k}^{EN}$  que representa a taxa de exergia dos produtos do componente  $k$  quando todos os demais componentes operam idealmente. Para isso o sistema todo é simulado separadamente e os comportamentos de todos os componentes, exceto o componente  $k$ , são aproximados para a condição ideal de operação e, em seguida, obtém-se a exergia dos produtos para o componente  $k$  é obtida para esse ponto. Além disso, para o sistema operando na condição analisada, calcula-se  $\left(\frac{\dot{Z}}{\dot{E}_P}\right)_k^{Real}$ .

## 4. Estudo de Caso - Sistema CGAM

### 4.1 Descrição do Sistema

O sistema objeto de estudo do presente trabalho no qual será aplicada a metodologia descrita anteriormente é um sistema de referência denominado Sistema CGAM. O sistema CGAM leva esse nome em homenagem aos seus idealizadores (C. Frangopoulos, G. Tsatsaronis, A. Valero e M. von Spakovsky) que decidiram usar o mesmo sistema para comparar a solução do problema de otimização com diferentes metodologias, o que faz desse sistema um *benchmark* entre pesquisadores [28]. Tal sistema foi escolhido por ser suficiente para atingir os objetivos do presente trabalho.

O sistema CGAM é um sistema de cogeração constituído de um compressor de ar (CA), uma câmara de combustão (CC), uma turbina a gás (TG), um pré-aquecedor de ar (PA) e uma caldeira de recuperação para geração de vapor (GV), que por sua vez é composta de um economizador (EC) para pré-aquecer a água e um evaporador (EV). O objetivo de tal ciclo é a geração de 30MW de energia elétrica e 14 kg/s de vapor saturado a uma pressão de 20 bar. A Figura 7 ilustra esse sistema.

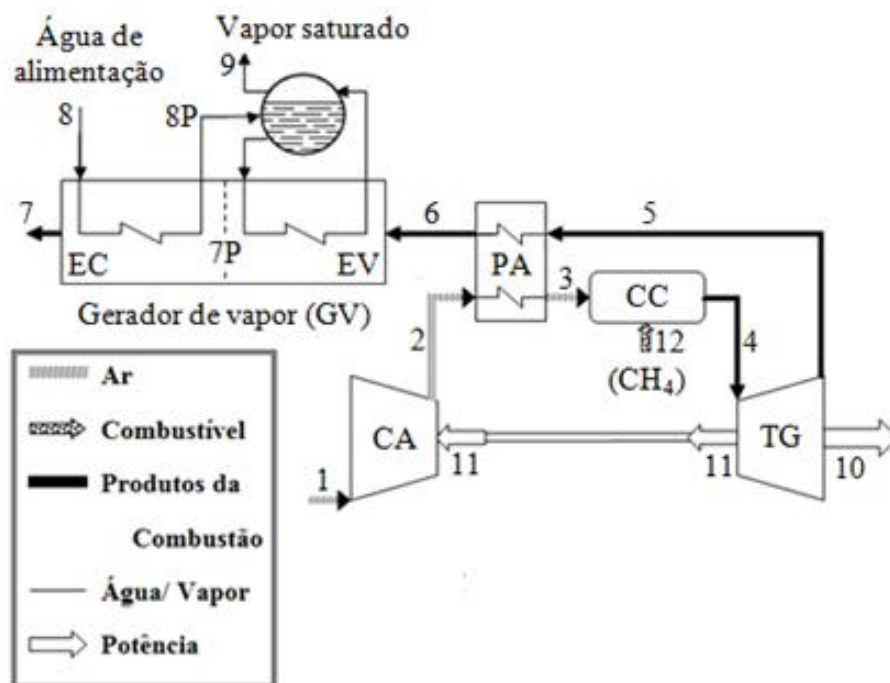


Figura 7. Sistema CGAM.

Para esse sistema as seguintes aproximações são feitas. O ar e os gases da combustão se comportam como gases ideais, com calor específico constante; considera-

se o combustível como metano puro e adota-se combustão completa; todos os componentes são adiabáticos, exceto a câmara de combustão. Além disso, o metano tem poder calorífico inferior igual a 50MJ/kg, o ar que entra no compressor está a uma temperatura de 25°C e pressão de 1,013 bar. A proposição original do modelo termodinâmico para esse sistema pode ser encontrada no Anexo A e em [28].

#### 4.2 Modelo Termodinâmico

No presente trabalho as equações termodinâmicas do sistema foram resolvidas pelo simulador IPSEpro. A Figura 8 ilustra a representação do Sistema CGAM construída no simulador.

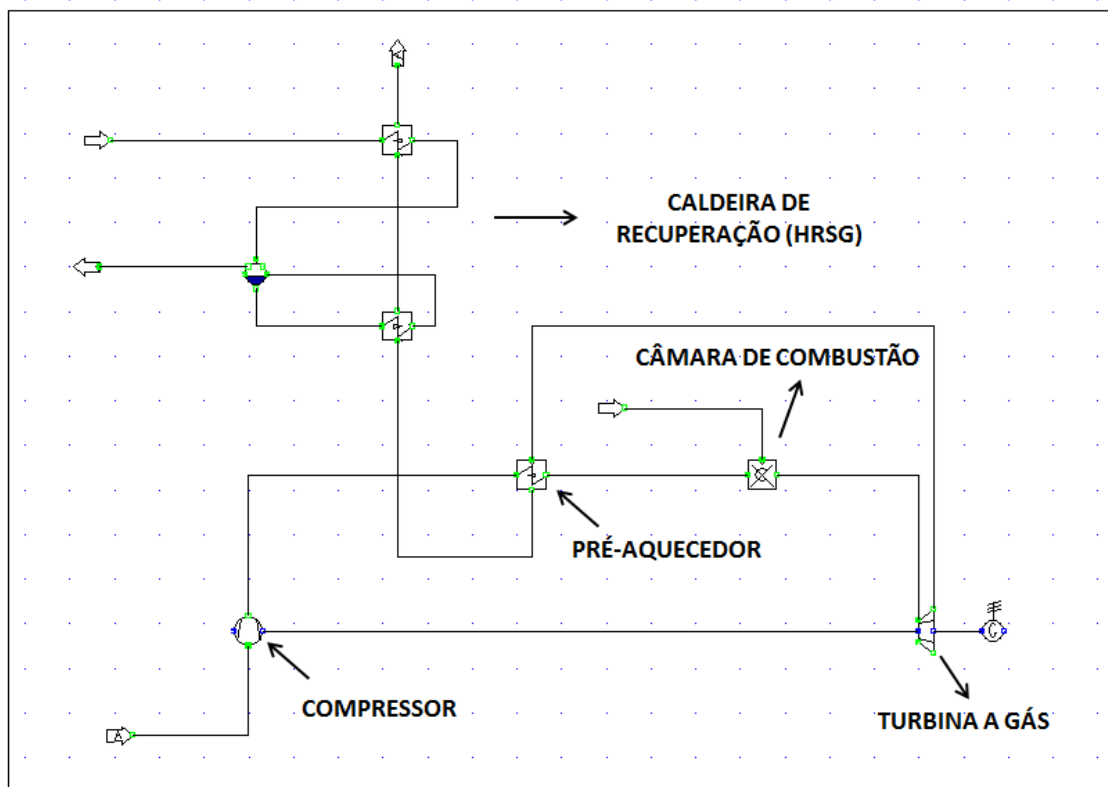


Figura 8. Sistema CGAM representado no IPSEpro.

#### 4.3 Modelo Econômico

A descrição econômica do sistema utilizado no presente trabalho é a mesma adotada no trabalho original [28] e considera o custo anual de combustível e o custo anual associado à aquisição e operação de cada equipamento. Tais equações são apresentadas a seguir:



Compressor

$$Z_{AC} = \left( \frac{C_{11}\dot{m}_a}{C_{12} - \eta_{AC}} \right) \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad (60)$$

Câmara de Combustão

$$Z_{cc} = \left( \frac{C_{21}\dot{m}_a}{C_{22} - \frac{P_4}{P_3}} \right) [1 + \exp(C_{23}T_4 - C_{24})] \quad (61)$$

Turbina

$$Z_{GT} = \left( \frac{C_{31}\dot{m}_g}{C_{32} - \eta_{GT}} \right) \ln \left( \frac{P_4}{P_5} \right) [1 + \exp(C_{33}T_4 - C_{34})] \quad (62)$$

Pré-Aquecedor

$$Z_{APH} = C_{41} \left( \frac{\dot{m}_g(h_5 - h_6)}{(U)(\Delta TLM)} \right)^{0,6} \quad (63)$$

Caldeira de Recuperação

$$Z_{HRSG} = C_{51} \left( \left( \frac{Q_{PH}}{(\Delta TLM)_{PH}} \right)^{0,8} + \left( \frac{Q_{PH}}{(\Delta TLM)_{PH}} \right)^{0,8} \right) + C_{52}\dot{m}_{st} + C_{53}\dot{m}_g^{1,2} \quad (64)$$

Nas equações acima, as variáveis  $\Delta TLM$  e  $Q$  representam a diferença de temperatura média logarítmica e a taxa de transferência de calor, respectivamente. A expressão geral para a taxa de custos (\$/s) relacionada ao investimento de cada componente é dada pela equação seguinte.

$$\dot{Z}_{i,invest} = \frac{Z_i \varphi CRF}{N \cdot 3600} \quad (65)$$

onde  $CRF$  é o fator de recuperação do capital (18,2%),  $N$  o número de horas anuais de operação da planta (8000h) e  $\varphi$  é um fator de manutenção (1,06). Além disso,  $c_f$  é o custo do combustível por unidade de energia (0,004\$/MJ). A Tabela 2 indica as constantes de custos adotadas para cada componente. A equação a seguir representa a taxa de custo total de operação.

$$F = c_f \dot{m}_f PCI + \dot{Z}_{AC} + \dot{Z}_{APH} + \dot{Z}_{CC} + \dot{Z}_{GT} + \dot{Z}_{HRSG} \quad (66)$$

Tabela 2. Constantes de custo para os componentes.

<b>Compressor</b>	$C_{11} = 39,5 \text{ } \$/(\frac{\text{kg}}{\text{s}}) \quad C_{12} = 0,9$
<b>Câmara de Combustão</b>	$C_{21} = 25,6 \text{ } \$/(\frac{\text{kg}}{\text{s}}) \quad C_{22} = 0,995$ $C_{23} = 0,018 \text{ } (\text{K}^{-1}) \quad C_{24} = 26,4$
<b>Turbina à Gás</b>	$C_{31} = 266,3 \text{ } \$/(\frac{\text{kg}}{\text{s}}) \quad C_{32} = 0,92$ $C_{33} = 0,036 \text{ } (\text{K}^{-1}) \quad C_{34} = 54,4$
<b>Pré-Aquecedor</b>	$C_{41} = 39,5 \text{ } \$/(\text{m}^{1,2}) \quad U = 0,018 \text{ kW}/(\text{m}^2 \text{ K})$
<b>Caldeira de Recuperação</b>	$C_{51} = 3650 \text{ } \$/(\frac{\text{kW}}{\text{K}})^{0,8} \quad C_{52} = 11820 \text{ } \$/(\frac{\text{kg}}{\text{s}})$ $C_{53} = 658 \text{ } \$/(\frac{\text{kg}}{\text{s}})^{1,2}$

Como é possível notar, os custos de investimento do compressor tendem a aumentar na medida em que sua razão de compressão e/ou sua eficiência isentrópica aumentam, ou seja, como esperado, a aquisição de um compressor com maior razão de compressão ou maior eficiência é mais custosa. Com relação a câmara de combustão, pode-se notar que seu investimento cresce com o aumento da temperatura de saída e com o aumento da razão das pressões de entrada e saída. Como já esperado, a aquisição de uma câmara de combustão que tenha menores quedas de pressão e que resista a maiores temperaturas é mais custosa, pois implicaria na utilização de materiais mais resistentes para suportar as temperaturas elevadas.

Já para a turbina, nota-se que os seus custos aumentam na medida em que sua eficiência isentrópica, razão de pressão e temperatura aumentam. Isso ocorre pois a aquisição de uma turbina que opere com maior eficiência, que conduza a uma maior queda de pressão e que resista a maiores temperaturas requer maiores gastos. Para o pré-aquecedor, nota-se que os custos aumentam na medida em que a diferença de entalpia tende a aumentar. Isso indicaria que a troca térmica se daria de maneira mais efetiva, conseqüentemente representaria um componente mais caro. Já para a caldeira de recuperação, pode-se perceber que o custo aumenta na medida em que as taxas de

transferência de calor também aumentam. Logo a aquisição de uma caldeira que permitisse uma melhor troca térmica seria mais custosa.

#### 4.4 Eficiência Exergética

Pode-se descrever a eficiência exergética global do sistema como sendo:

$$\varepsilon = \frac{30MW + \dot{m}_{st}e_{st@20bar}}{\dot{m}_f PCI_{CH_4}} \quad (67)$$

onde  $\dot{m}_{st}$  é a vazão mássica de vapor,  $e_{st@20bar}$  é a exergia específica de vapor saturado a 20 bar,  $\dot{m}_f$  é a vazão mássica de combustível e  $PCI_{CH_4}$  é o poder calorífico inferior do metano. No numerador, o valor de 30 MW se refere a potência elétrica produzida pelo sistema.

#### 4.5 Critérios para Otimização

Para solução do problema de otimização são consideradas as cinco variáveis de decisão adotadas na definição do problema original, são elas: a relação de compressão ( $P_2/P_1$ ), a eficiência isentrópica do compressor ( $\eta_{CA}$ ), a eficiência isentrópica da turbina ( $\eta_{GT}$ ), a temperatura do ar na saída do pré-aquecedor ( $T_3$ ) e a temperatura do gás de combustão na entrada na turbina ( $T_4$ ). Para encontrar a condição de menor custo, o objetivo é minimizar a função objetivo do problema dada pela taxa de custo total, indicada na equação (66). Já para encontrar a condição de maior eficiência, o objetivo é maximizar a função eficiência exergética, dada pela equação (67).

Para realizar a otimização, foram estabelecidos os limites para as variáveis do problema. Os limites adotados são apresentados na Tabela 3 [29-30]. Além disso, foi necessário definir os parâmetros de otimização utilizados em cada um dos métodos de otimização, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 3. Limites das variáveis para otimização.

<b>Limites</b>
$7 \leq P_2/P_1 \leq 27$
$0,7 \leq \eta_{AC} \leq 0,9$
$0,7 \leq \eta_{GT} \leq 0,9$
$700 \leq T_3 \leq 1100$
$1100 \leq T_4 \leq 1500$

Tabela 4. Parâmetros escolhidos para otimização.

Parâmetros	Valores
População de indivíduos	60
Iterações (Heurístico)	20
Iterações (Determinístico)	20

#### 4.6 Determinação do Ponto Arbitrário

O ponto arbitrário corresponde a uma condição operacional distinta da condição de menor custo e maior eficiência. Sendo assim, decidiu-se adotar o ponto utilizado no Caso 1 do trabalho de VIEIRA (2003) e o mesmo é indicado na Tabela 5.

Tabela 5. Variáveis do ponto arbitrário.

Pto Arbitrário	
$P_2/P_1$	8,0
$\eta_{AC}$	0,80
$T_3$	626,85
$\eta_{GT}$	0,80
$T_4$	1126,85
<i>Custo (\$/s)</i>	0,4086
<i>Eficiência Exergética</i>	0,4445

#### 4.7 Critérios para Análise Exergética Avançada

A seguir serão apresentados os critérios adotados para a obtenção das parcelas evitáveis, inevitáveis, endógenas e exógenas da destruição de exergia, dos custos de destruição e de investimento, conforme metodologia descrita no item 3.2. Foram utilizadas simulações no IPSEpro do sistema completo e dos componentes individualmente.

##### 4.7.1 Destruição Exergética, Custos de Destruição Exergética e Taxas de Investimento Evitáveis e Inevitáveis

Como visto, para a obtenção das parcelas evitáveis e inevitáveis da destruição, dos custos de destruição e das taxas de investimento é necessário que os componentes sejam simulados individualmente, estabelecendo-se condições de máxima e mínima eficiência exergética. A determinação das condições envolve a escolha das variáveis termodinâmicas que serão modificadas, bem como o valor atribuído a elas.

Para o presente trabalho, buscou-se manter as mesmas variáveis termodinâmicas e os valores apresentados na literatura [16-17], conforme visto no item 3.2. Escolheu-se novas variáveis termodinâmicas apenas nos casos em que uma pequena alteração na variável utilizada na literatura conduzia a erros na simulação (Ex: Diferença mínima de temperatura negativa, erros no balanço de massa, temperaturas negativas em Kelvin). Nesse caso, optou-se por realizar testes no simulador para escolher novas variáveis que pudessem ser alteradas para o estabelecimento das condições de máxima e mínima eficiências exergéticas, como apresentado a seguir. Com relação aos valores associados às variáveis, houve alteração nos casos em que a utilização dos valores descritos na literatura nas condições analisadas neste trabalho conduziu a erros de simulação. Nesse caso, adotaram-se os valores mais próximos aos valores da literatura, mas que permitissem a simulação rodar sem erros.

Na simulação individual dos componentes, para a obtenção das parcelas evitáveis e inevitáveis, alterou-se somente a variável escolhida para estabelecer as condições de maior e menor eficiência exergética, mantendo todas as demais variáveis termodinâmicas do componente na condição analisada (Ex: Pressões e temperaturas das correntes de entrada e saída, quedas de pressão, diferenças mínimas de temperatura etc). Nos casos em que havia mais variáveis impostas ao componente do que necessário para a solução do sistema termodinâmico, algumas variáveis foram deixadas livres para permitir uma solução única do problema. Em geral, buscou-se manter as variáveis de entrada do componente e deixar as variáveis de saída como parâmetro de resposta da simulação.

A seguir serão apresentadas as variáveis termodinâmicas escolhidas e os valores atribuídos a elas para cada componente. Além disso, também são apresentadas as análises feitas no IPSEpro realizadas com o intuito de ilustrar a influência qualitativa das variáveis escolhidas para cada componente na eficiência exergética.

## I. Compressor

Seguindo os mesmos parâmetros utilizados na literatura, adotou-se o valor de 90% para a eficiência isentrópica considerando o compressor mais eficiente e 70% para o componente menos eficiente. A Figura 9 ilustra a influência da eficiência isentrópica na eficiência exergética.

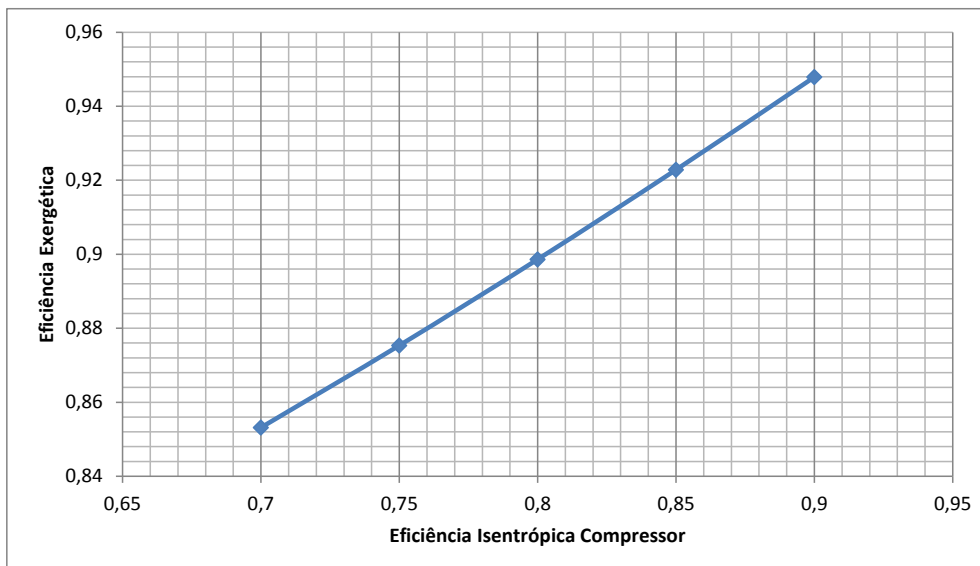


Figura 9. Influência da eficiência isentrópica na eficiência exergética do Compressor.

## II. Pré-Aquecedor

Para o pré-aquecedor, utilizou-se como variável a diferença mínima de temperatura e os valores utilizados foram alterados para o mais próximo da literatura que permitisse a solução do sistema. Utilizou-se o valor para diferença mínima de temperatura de 30°C para o pré-aquecedor operando em maior eficiência exergética e 130°C operando para menor eficiência exergética. A Figura 10 ilustra a influência da diferença mínima de temperatura no pré-aquecedor

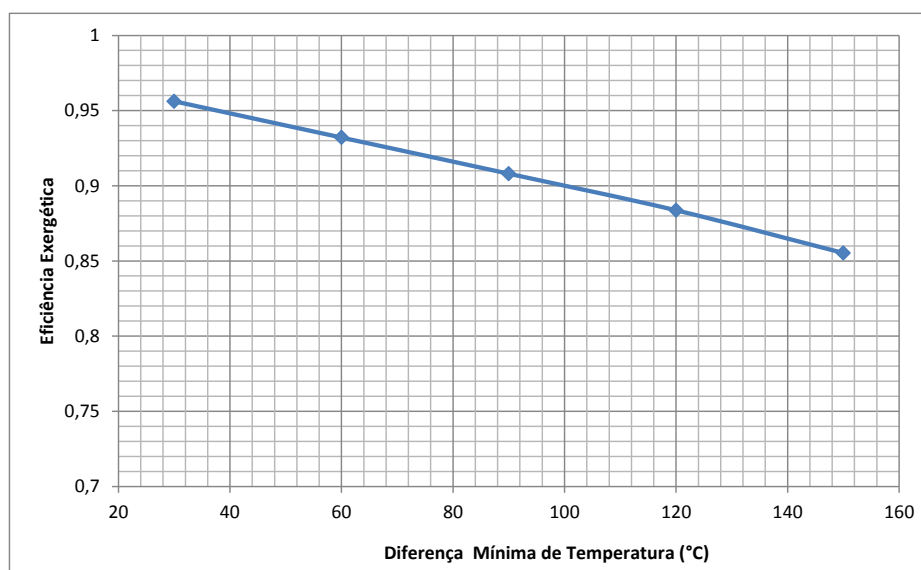


Figura 10. Influência da diferença mínima de temperatura na eficiência exergética do pré-aquecedor.

### III. Câmara de Combustão

Pode-se notar que a temperatura de entrada e a queda de pressão na câmara tem influência direta na sua eficiência exergética, conforme ilustrado Figuras 11 e 12, respectivamente. Para a condição de melhor eficiência assumiu-se a temperatura do ar de admissão de  $727^{\circ}\text{C}$  ( $1000\text{K}$ ). Já para a condição de menor eficiência, adotou-se o valor de 20% de queda de pressão entre a entrada e saída da câmara. Foram escolhidas as mesmas variáveis da literatura e seus valores foram alterados para permitir a solução do sistema.

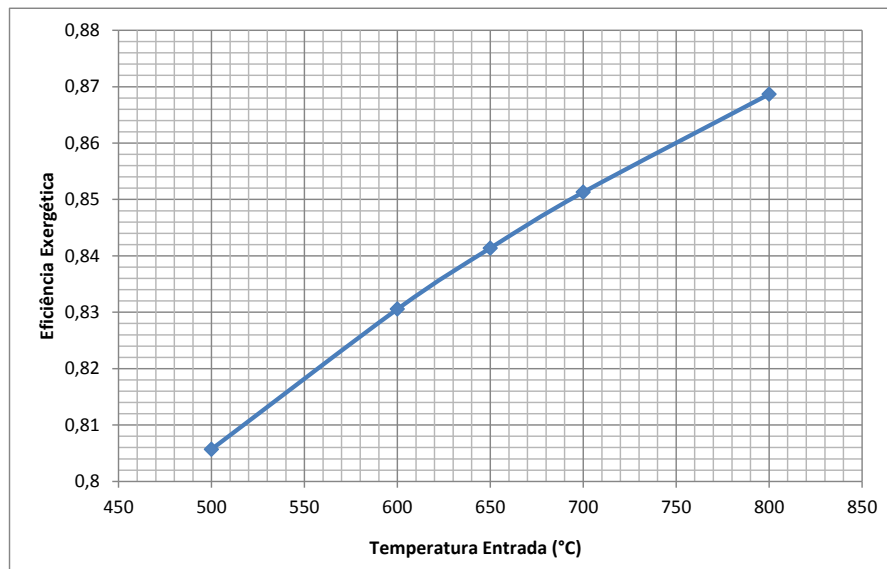


Figura 11. Influência da temperatura de entrada na eficiência exergética da câmara de combustão.

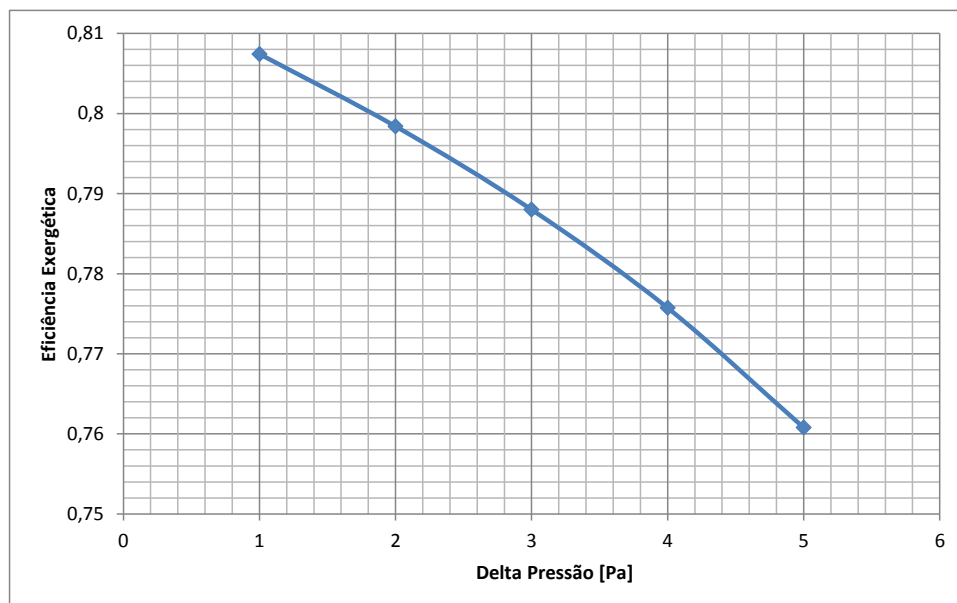


Figura 12. Influência da queda de pressão na eficiência exergética da câmara de combustão.

#### IV. Turbina a Gás

Seguindo os parâmetros utilizados na literatura, utilizou-se o valor de 90% para a eficiência isentrópica considerado para a turbina operando em maior eficiência exergética e 70%, em menor eficiência. A Figura 13 ilustra a influência da eficiência isentrópica na eficiência exergética.

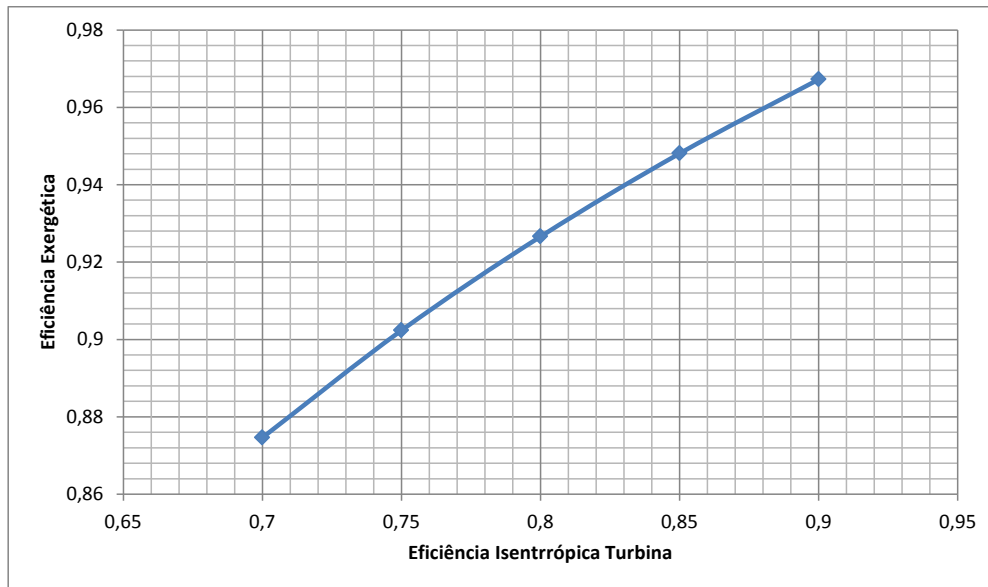


Figura 13. Influência da eficiência isentrópica na eficiência exergética da Turbina.

#### V. Caldeira de Recuperação de Vapor

Para a caldeira, notou-se que não era possível variar o parâmetro escolhido na literatura sem conduzir a erros de simulação. Para isso, novas variáveis foram selecionadas a partir de simulações no IPSEpro no sentido de estabelecer as condições de maior e menor eficiências exergéticas. Percebeu-se a influência da temperatura de entrada da caldeira e da queda de pressão na eficiência exergética, ilustrados nas Figuras 14 e 15, respectivamente. Para a caldeira de maior eficiência, adotou-se uma queda de pressão de 0,02%, enquanto que para a de menor eficiência adotou-se como temperatura de entrada 700°C.



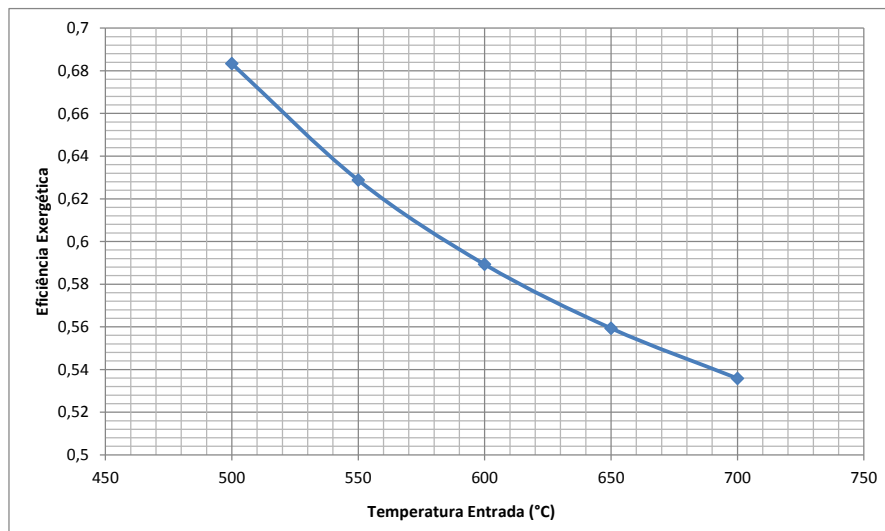


Figura 14. Influência da temperatura de entrada da Caldeira na eficiência exergética.

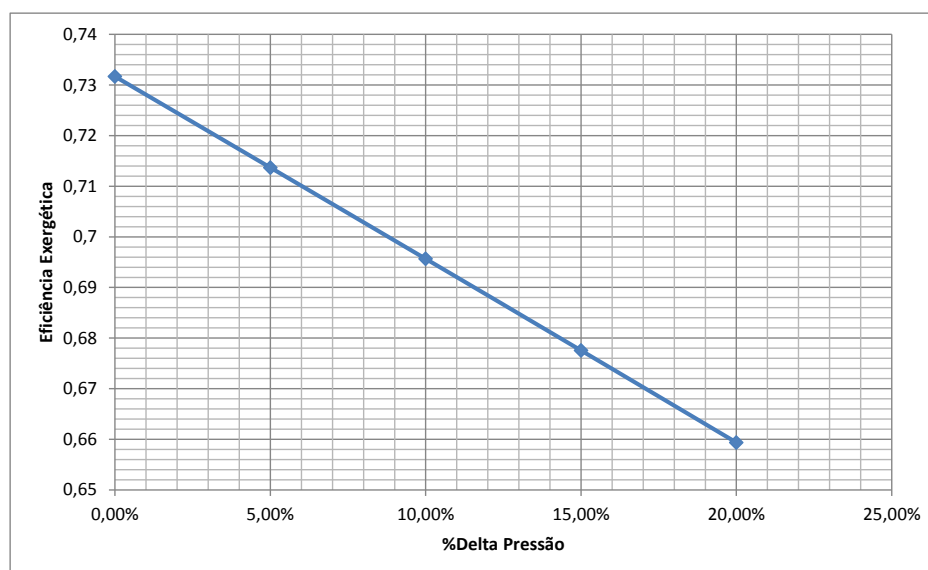


Figura 15. Influência da queda de pressão da Caldeira na eficiência exergética.

Na Tabela 6 é apresentado um resumo das variáveis escolhidas e os valores atribuídos a elas para as condições de maior e menor eficiência exergética de cada componente. Os traços na tabela indicam que o valor atribuído a variável da linha do traço foi mantido o mesmo da condição analisada.

Tabela 6. Variáveis e valores escolhidos para condições de maior e menor eficiência exergética.

	<b>Variáveis</b>	<b>Maior Eficiência</b>	<b>Menor Eficiência</b>
<i>Compressor</i>	$\eta$	90%	70%
<i>Pré-Aquecedor</i>	$\Delta T_{min}$	30°C	227°C
<i>Câmara de Combustão</i>	$T_3$	723°C	-
	$\Delta P$	-	3 bar
<i>Turbina a Gás</i>	$\eta$	90%	70%
<i>HRSG</i>	$\Delta P$	0,02%	-
	$T_6$	-	700°C

#### 4.7.2 Destruição Exergética, Custos de Destruição Exergética e Taxas de Investimento Endógenas e Exógenas

Como visto, para obter as parcelas endógenas e exógenas de destruição exergética, faz-se necessário que a eficiência do componente analisado seja mantida e a dos demais componentes seja variada para que os resultados sejam colocados em um gráfico. Para variar a eficiências dos demais componentes, foram alteradas livremente as variáveis termodinâmicas associadas as eficiências desses componentes. A seguir serão apresentadas as premissas e os parâmetros adotados para a obtenção das parcelas endógena e exógena de destruição exergética, das taxas de investimento e dos custos de destruição.

##### I. Compressor

Para a obtenção das parcelas de destruição exergética do compressor foram mantidas constantes a eficiência isentrópica e a razão de pressão deste. Para variar a destruição dos demais componentes, alterou-se a eficiência isentrópica da turbina e a temperatura de entrada da câmara de combustão, que altera, ao mesmo tempo, a destruição exergética do pré-aquecedor, da câmara de combustão e caldeira. Para o cálculo da parcela endógena de investimento, foi mantida a eficiência exergética deste e aproximou-se o comportamento dos demais componentes para o ideal, conforme condições estabelecidas no item 4.7.1.

## II. Pré-Aquecedor

Para a obtenção das parcelas de destruição exergética do pré-aquecedor, modificou-se tanto a destruição exergética do compressor quanto da turbina variando-se suas eficiências isentrópicas. Já a eficiência exergética da câmara de combustão foi alterada, variando-se sua queda de pressão. Essas modificações alteram a temperatura de entrada da caldeira, consequentemente sua eficiência exergética. Para o cálculo da parcela endógena de investimento, foi mantida a eficiência exergética deste e aproximou-se o comportamento dos demais componentes para o ideal, conforme condições estabelecidas no item 4.7.1.

## III. Câmara de Combustão

Para determinação da parcela endógena de destruição de exergia da câmara de combustão, as eficiências isentrópicas do compressor e da turbina foram modificadas. Esse procedimento também reduz a exergia destruída no pré-aquecedor e na caldeira. Para o cálculo da parcela endógena de investimento da câmara de combustão, foi mantida a eficiência exergética desta e aproximou-se o comportamento dos demais componentes para o ideal, conforme condições estabelecidas no item 4.7.1.

## IV. Turbina a Gás

Para determinação da parcela endógena de destruição de exergia da Turbina a Gás, variou-se a eficiência isentrópica do compressor e a temperatura de entrada da câmara de combustão, que altera, ao mesmo tempo, a destruição exergética do pré-aquecedor, da câmara de combustão e caldeira. Para o cálculo da parcela endógena de investimento da turbina, foi mantida a eficiência exergética desta e aproximou-se o comportamento dos demais componentes para o ideal, conforme condições estabelecidas no item 4.7.1.

## V. Caldeira Recuperadora de Vapor

Como o Método de Engenharia foi utilizado para determinação da parcela endógena de destruição de exergia, a eficiência exergética da caldeira de recuperação de vapor (HRSG) deve manter-se constante, o que implica que sua destruição exergética se mantenha fixa também. Nesse caso, toda destruição de exergia é considerada endógena para esse componente. Para o cálculo da parcela endógena de investimento da Caldeira,

foi mantida a eficiência exergética desta e aproximou-se o comportamento dos demais componentes para o ideal, conforme condições estabelecidas no item 4.7.1.

A Tabela 7 apresenta um resumo das variáveis alteradas para cada componente para levantamento do gráfico para determinar a parcela endógena de destruição.

Tabela 7. Variáveis alteradas para determinação das parcelas endógenas.

<b>Variáveis alteradas</b>	
<i>Compressor</i>	$\eta_{GT} ; T_3$
<i>Pré-Aquecedor</i>	$\eta_{AC} ; \eta_{GT} ; \Delta P_{CC}$
<i>Câmara de Combustão</i>	$\eta_{AC} ; \eta_{GT}$
<i>Turbina a Gás</i>	$\eta_{AC} ; T_3$
<i>HRSG</i>	<i>Toda parcela é endógena</i>

## 5. Resultados

A seguir serão apresentados os resultados da otimização realizada com os métodos híbridos, bem como os resultados da análise exergoeconômica convencional e avançada nas condições de menor custo, de maior eficiência e arbitrária.

### 5.1 Condição de Menor Custo

#### 5.1.1 Otimização

No Anexo B são apresentados os gráficos da evolução da função objetivo (custo) em relação a chamada da função objetivo para as otimizações realizadas. A Tabela 8 apresenta os resultados finais para as variáveis de decisão em cada método e o valor da função objetivo.

Tabela 8. Resultados para cada Método Híbrido.

	Híbrido 1	Híbrido 2	Híbrido 3	Híbrido 4	Híbrido 5	Híbrido 6
$P_2/P_1$	9,46	9,04	8,29	8,72	9,61	8,90
$\eta_{AC}$	0,83	0,83	0,85	0,84	0,83	0,84
$T_3$	600,4	612,5	606,5	603,9	610,3	614,6
$\eta_{GT}$	0,88	0,88	0,88	0,87	0,87	0,85
$T_4$	1210,9	1212,7	1214,7	1186,6	1195,5	1188,6
<i>Função Obj(\$/s)</i>	0,33948	0,33953	0,33949	0,34201	0,34167	0,34551

De maneira a avaliar o desempenho de cada método, verificou-se o tempo de execução que cada método levou, bem como o número de chamadas da função objetivo. Como é possível notar pelas Figuras 16 e 17, os métodos que levaram mais tempo e chamaram mais vezes a função objetivo foram os métodos híbridos 3 e 6. Esse desempenho já era esperado, uma vez que o método de Newton envolve o cálculo do Hessiano de uma função, o que exige que se chame a função objetivo mais vezes, além de ser computacionalmente mais custoso.

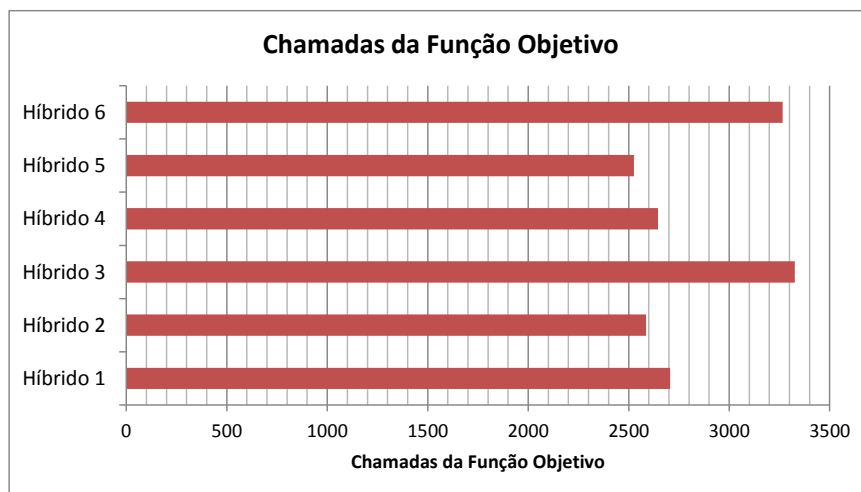


Figura 16. Comparação entre o número de chamadas da função objetivo para cada método.

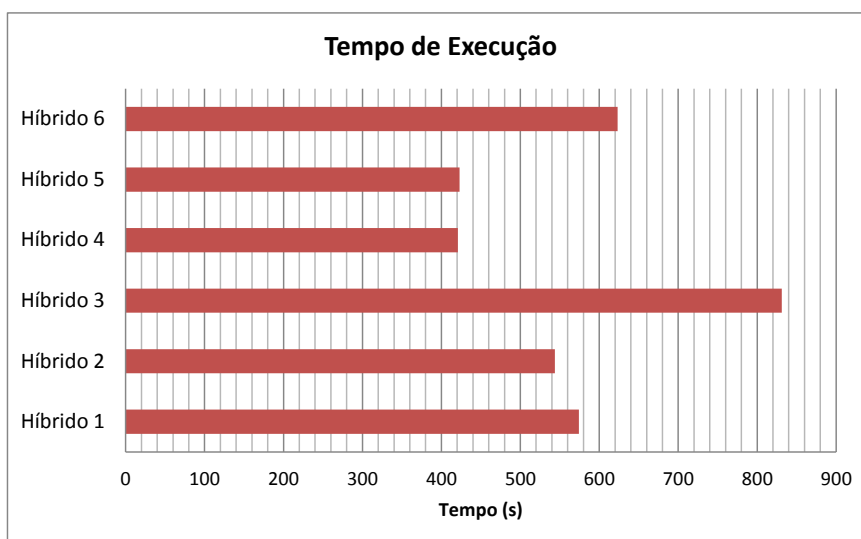


Figura 17. Comparação entre o tempo computacional de cada método.

Foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos no presente trabalho com aqueles obtidos por VALERO [28] e PIRES [29]. É válido ressaltar que a formulação termodinâmica utilizada por VALERO é ligeiramente diferente daquela construída no simulador, portanto algumas diferenças em relação ao valor final da função objetivo já eram esperadas. No trabalho de PIRES, o sistema CGAM também foi construído no IPSEpro e a otimização foi realizada em Matlab<sup>®</sup> utilizando os seguintes métodos de otimização: Evolução Diferenciada (ED), Enxame de Partículas (EP), Recozimento Simulado (RS), Algoritmo Genético (AG) e Busca Direta em Padrões (BP). Uma comparação entre os resultados é apresentado na Figura 18.

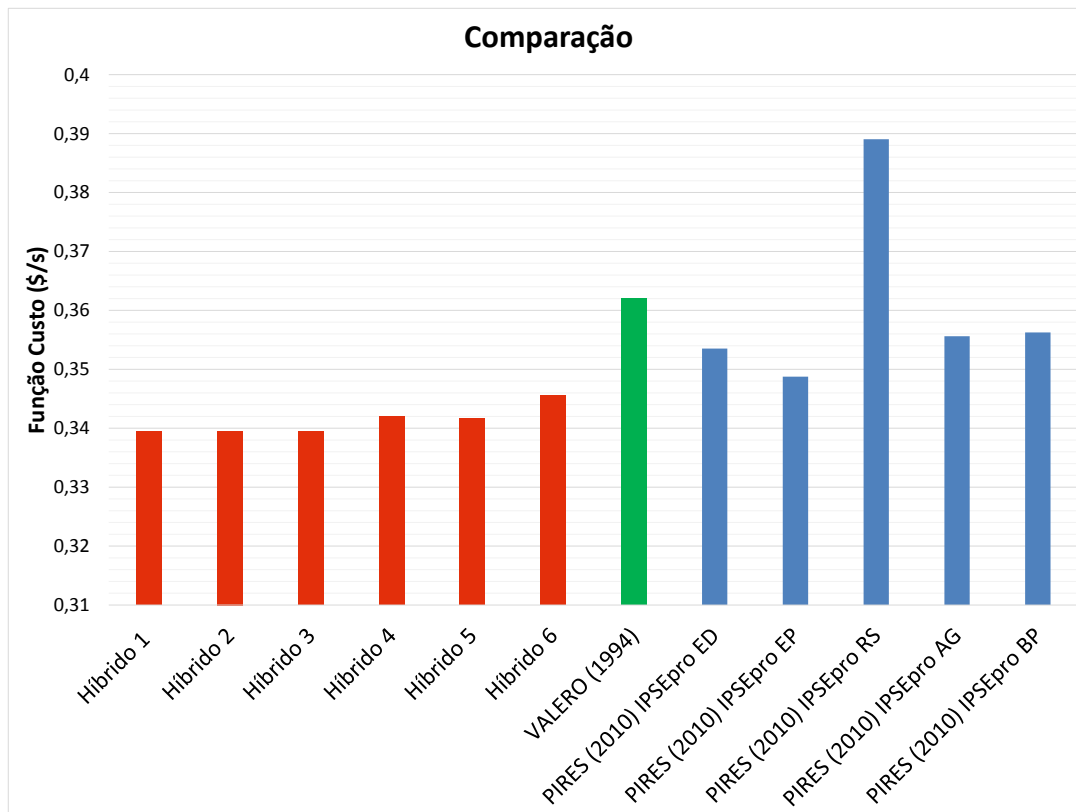


Figura 18. Comparação entre os resultados obtidos e referências bibliográficas.

Como é possível notar, os métodos híbridos utilizados nesse trabalho tiveram um excelente desempenho, estando os valores encontrados compatíveis com as demais referências. Esse resultado consolidou a utilização das formulações híbridas utilizadas para otimização da função objetivo do problema.

Como pode-se notar pela Tabela 8, o método que apresentou o menor valor da função objetivo foi o Híbrido 1, portanto, o resultado obtido com esse método foi selecionado como de menor custo para a análise exergoeconômica avançada.

### 5.1.2 Análise Exergoeconômica Convencional e Avançada

A seguir são apresentados os resultados da Análise Exérgica Avançada para o sistema CGAM operando na condição de menor custo. Como visto, tal análise inicia-se com uma análise exérgica convencional, obtendo-se a destruição exérgica, eficiência exérgica e razão de destruição de exergia para cada um dos componentes. Os resultados são apresentados na Tabela 9 e na Figura 19.

Tabela 9. Destruição exergetica para ponto de menor custo.

	$\dot{E}_F$ [MW]	$\dot{E}_P$ [MW]	$\dot{E}_D$ [MW]	$\varepsilon$	$y_D$
<i>Compressor</i>	31,61	28,86	2,75	0,913	0,076
<i>Câmara de Combustão</i>	124,87	101,41	23,46	0,812	0,652
<i>Turbina a Gás</i>	64,23	61,61	2,62	0,959	0,073
<i>HRSO</i>	17,68	12,77	4,91	0,722	0,136
<i>Pré-Aquecedor</i>	18,27	16,03	2,24	0,877	0,062

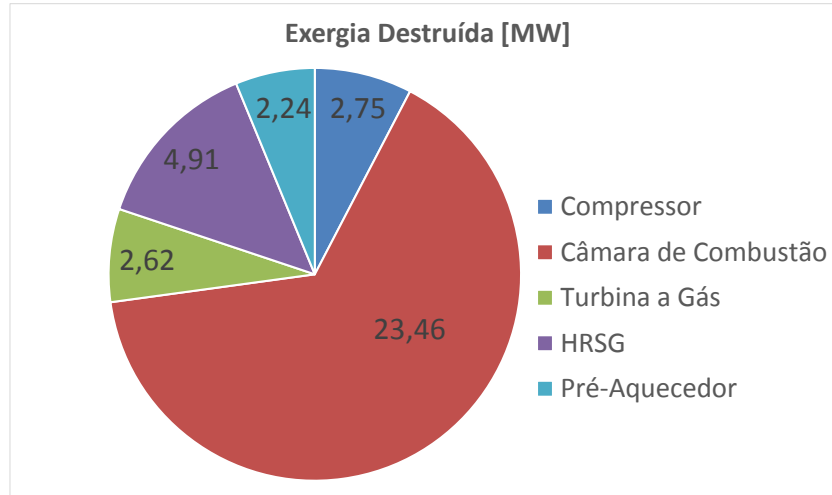


Figura 19. Destruição exergetica para ponto de menor custo.

Como se pode notar, a Câmara de combustão é o componente que mais destrói a exergia do sistema, seguido pela caldeira de recuperação e o compressor. A maior parte da destruição de exergia ocorrida na câmara está associada ao processo de combustão que é um processo altamente irreversível. Dessa maneira, a razão de destruição encontrada para esse componente é o maior entre todos.

Ainda como parte da análise convencional, obteve-se os custos dos combustíveis, os custo dos produtos, os custos de destruição e de investimentos, além do cálculo do fator exergoeconômico e da razão relativa de custos para cada componente. A Tabela 10 e a Figura 20 apresentam tais resultados.

Tabela 10. Custos de destruição e taxas de investimento para ponto de menor custo.

	$\dot{C}_F$ [\$/h]	$\dot{C}_P$ [\$/h]	$\dot{C}_D$ [\$/h]	$\dot{Z}$ [\$/h]	$\dot{C}_D + \dot{Z}$ [\$/h]	$f$	$r$
<i>Compressor</i>	773,4	761,4	67,3	27,4	94,8	0,290	0,078
<i>Câmara de Combustão</i>	2304,1	2307,2	432,8	3,1	436,0	0,007	0,233
<i>Turbina a Gás</i>	1461,3	1507,4	59,7	46,1	105,7	0,436	0,075
<i>HRSO</i>	402,2	422,5	111,7	20,3	132,0	0,154	0,455
<i>Pré-Aquecedor</i>	415,7	432,0	51,0	16,3	67,3	0,242	0,185



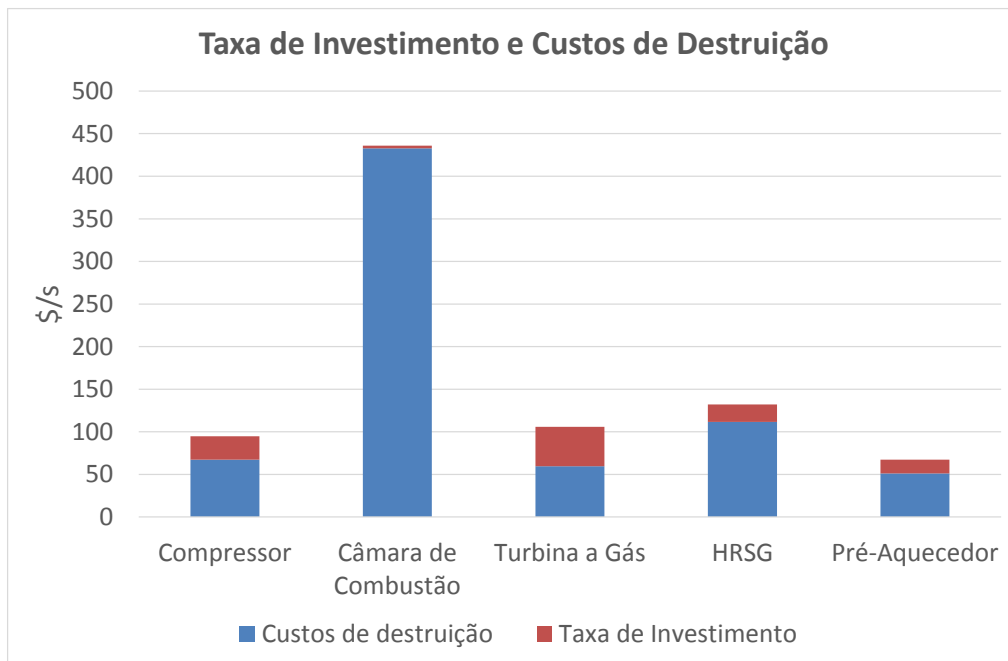


Figura 20. Custos de destruição e taxas de investimento para ponto de menor custo.

Como é possível notar, o componente que apresenta a maior taxa de investimento é a Turbina a Gás e o que apresenta o maior custo de destruição é a câmara de combustão. Como o fator exergoeconômico indica, as participações dos custos de investimento no custo total para câmara de combustão e a caldeira de recuperação são as menores no sistema, indicando que os custos de destruição são muito mais significativos que os de investimento para esses componentes, representando 0,7% dos custos totais para a câmara e 15,4% para a caldeira.

Caso fosse estabelecida uma ordem de prioridade para melhoria do sistema priorizando-se os componentes em função da magnitude destruição exergética, a ordem seria a seguinte: 1º Câmara de Combustão, 2º Caldeira de Recuperação, 3º Compressor, 4º Turbina a Gás e 5º Pré-Aquecedor. Se o critério de prioridade fosse a magnitude dos custos totais, a ordem passaria a ser a seguinte: 1º Câmara de Combustão, 2º Caldeira de Recuperação, 3º Turbina a Gás, 4º Compressor e 5º Pré-Aquecedor.

Uma vez obtidas as exergias destruídas, os custos de destruição e as taxas de investimento, prossegue-se para a análise exergética avançada, onde as parcelas evitáveis/inevitáveis e endógena/exógena da destruição, dos custos de destruição e das taxas de investimentos são obtidos. Inicialmente, obteve-se as destruições e custos evitáveis e inevitáveis do sistema. A Tabela 11 e a Figura 21 apresentam tais resultados.

Tabela 11. Destruição exergética evitável e inevitável para o ponto de menor custo.

	$\dot{E}_D$ [MW]	$(\dot{E}_D/\dot{E}_P)^{UN}$	$\dot{E}_D^{AV}$ [MW]	$\dot{E}_D^{UN}$ [MW]
<i>Compressor</i>	2,75	0,055	1,18	1,58
<i>Câmara de Combustão</i>	23,46	0,192	3,96	19,50
<i>Turbina a Gás</i>	2,62	0,034	0,50	2,12
<i>HRSG</i>	4,91	0,364	0,27	4,64
<i>Pré-Aquecedor</i>	2,24	0,046	1,51	0,73

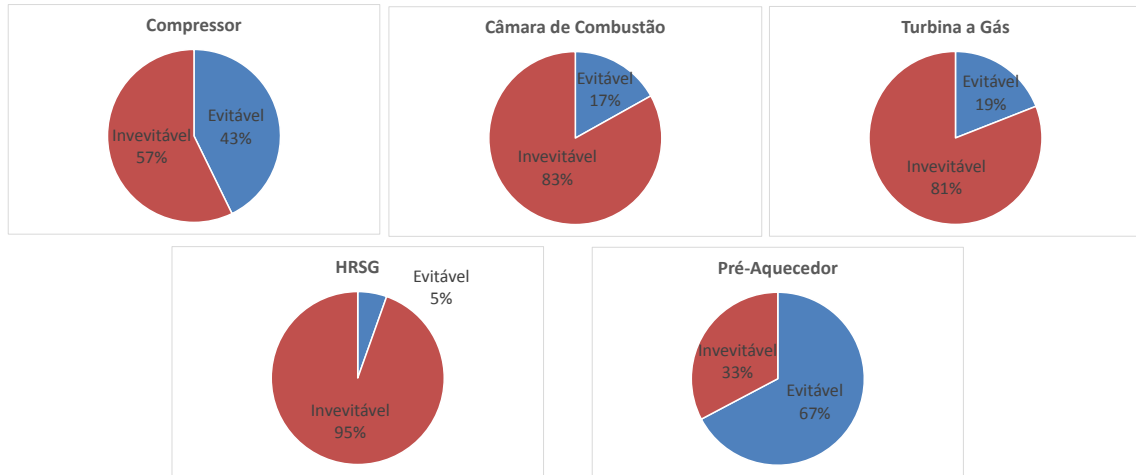


Figura 21. Destruição exergética evitável e inevitável para o ponto de menor custo.

Como é possível notar, os componentes que apresentam maiores potenciais de melhoria são o compressor e o pré-aquecedor, uma vez que suas parcelas de destruição evitável são percentualmente maiores. Entretanto, em valores absolutos, a quantidade de exergia destruída evitável da câmara de combustão é bem superior às demais destruições evitáveis (3,96 MW), sendo pouco mais de três vezes maior que a maior destruição evitável do compressor. O sistema operando nessa condição pode evitar 7,41 MW de destruição exergética.

Na sequência, foram obtidas as parcelas evitáveis e inevitáveis dos custos de destruição e as taxas de investimentos. A Tabela 12 e Figura 22 apresentam tais resultados.

Tabela 12. Custos de destruição e taxas de investimento evitáveis e inevitáveis para ponto de menor custo.

	$\dot{Z}$ [\$/h]	$\dot{Z}^{AV}$ [\$/h]	$\dot{Z}^{UN}$ [\$/h]	$\dot{C}_D$ [\$/h]	$\dot{C}_D^{AV}$ [\$/h]	$\dot{C}_D^{UN}$ [\$/h]	$\dot{Z}^{AV} + \dot{C}_D^{AV}$ [\$/h]	$f^*$
<i>Compressor</i>	27,4	18,6	8,9	67,3	28,8	38,5	47,4	0,392
<i>Câmara de Combustão</i>	3,1	2,7	0,5	432,8	73,1	359,7	75,8	0,035
<i>Turbina a Gás</i>	46,1	35,0	11,1	59,7	11,4	48,3	46,3	0,755
<i>HRSG</i>	20,3	9,6	10,8	111,7	6,1	105,6	15,6	0,612
<i>Pré-Aquecedor</i>	16,3	0,1	16,2	51,0	34,3	16,7	34,4	0,003

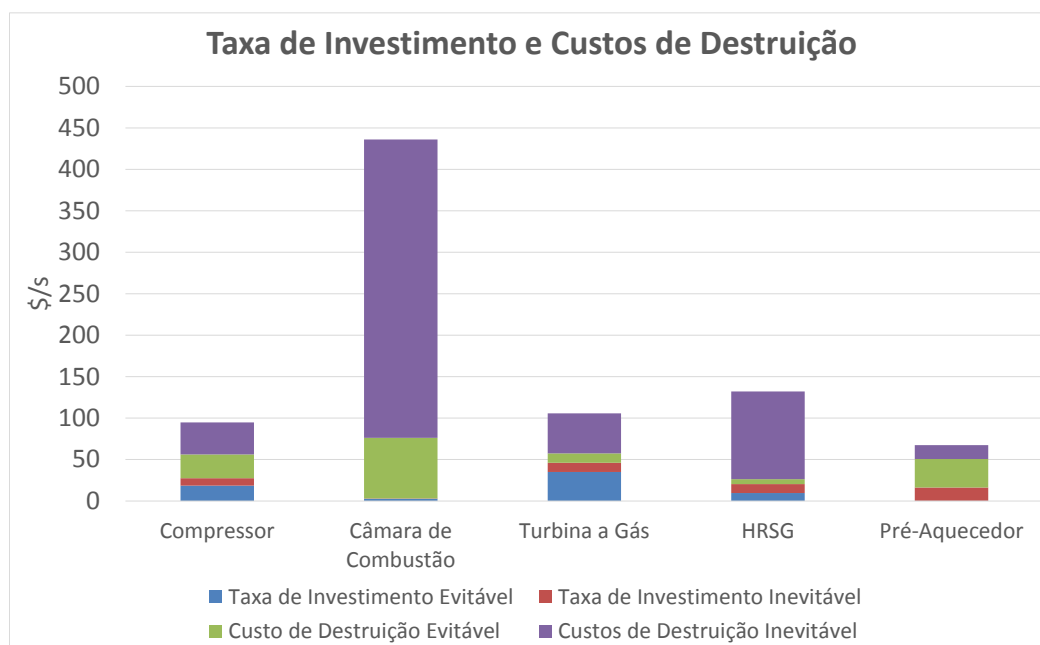


Figura 22. Custos de destruição e taxas de investimento evitáveis e inevitáveis para ponto de menor custo.

Analisando os custos, percebe-se que os custos evitáveis, caracterizados pela soma das taxas de investimentos e custos de destruição evitáveis, da câmara de combustão são maiores que os demais, seguido pelo compressor e turbina. Esse resultado indica o potencial de redução dos custos do sistema associados a esses componentes. Ao verificar os fatores exergoeconômicos, levando-se em conta apenas as parcelas evitáveis dos componentes, percebe-se que as contribuições dos investimentos evitáveis no custo evitável total para a turbina e a caldeira são os maiores. No total, para o sistema operando nessa condição de menor custo, cerca de 219,5 \$/h podem ser evitados.

Em seguida obteve-se as destruições exergéticas endógenas e exógenas para os componentes. As destruições exergéticas foram obtidas segundo o Método de

Engenharia, conforme descrito no item 2.2.2. Os gráficos obtidos utilizando esse método são indicados nas Figuras 23, 24, 25 e 26.

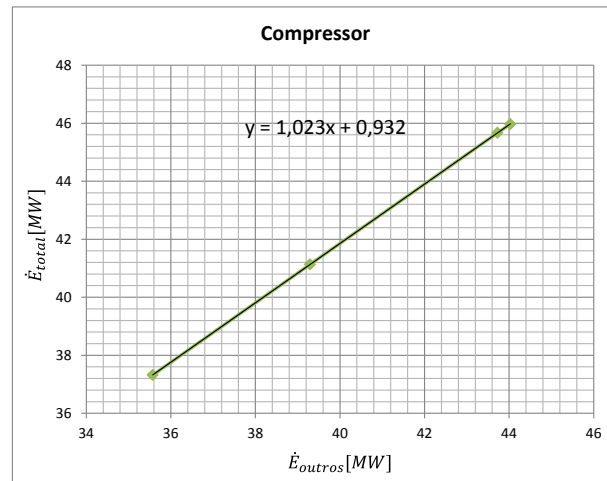


Figura 23. Determinação da destruição exergética endógena do Compressor.

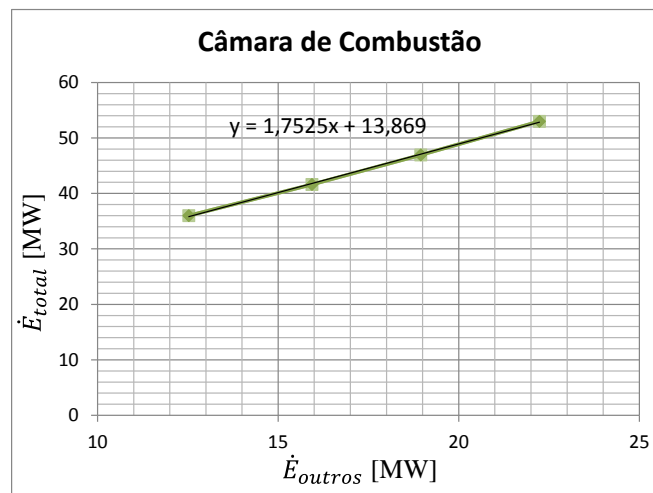


Figura 24. Determinação da destruição exergética endógena da Câmara de Combustão.

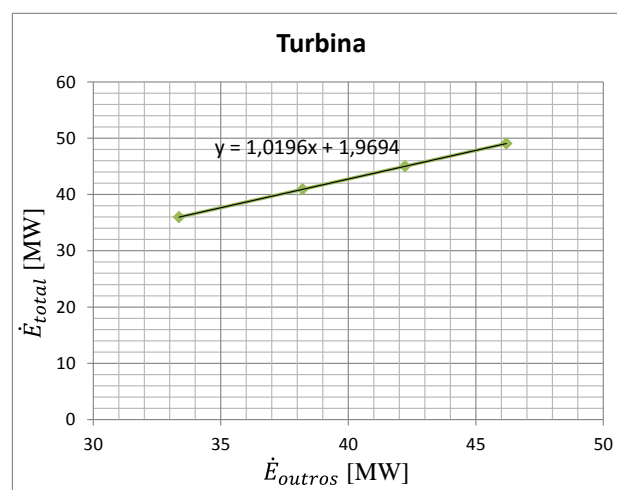


Figura 25. Determinação da destruição exergética endógena da Turbina a Gás.

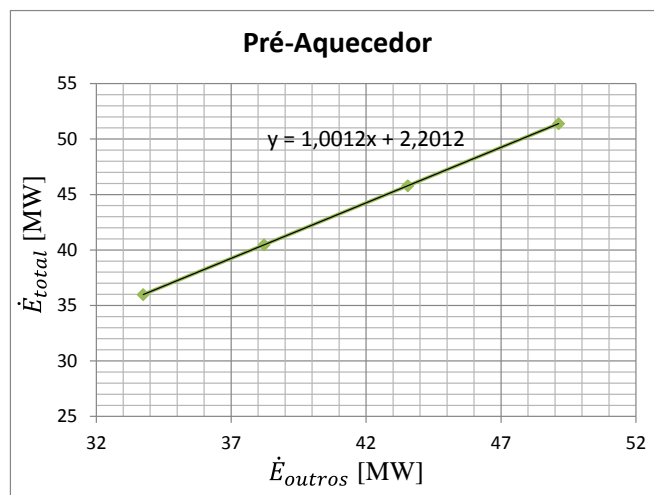


Figura 26. Determinação da destruição exérgica endógena do Pré-Aquecedor.

A Tabela 13 e a Figura 27 indicam as parcelas endógenas e exógenas para as destruições exérgicas dos componentes do sistema.

Tabela 13. Destruição exérgica endógena e exógena para o ponto de menor custo.

	$\dot{E}_D$ [MW]	$\dot{E}_D^{EN}$ [MW]	$\dot{E}_D^{EX}$ [MW]
<i>Compressor</i>	2,75	1,46	1,30
<i>Câmara de Combustão</i>	23,46	13,87	9,59
<i>Turbina a Gás</i>	2,62	1,97	0,65
<i>HRS</i>	4,91	4,91	0,00
<i>Pré-Aquecedor</i>	2,24	2,20	0,04

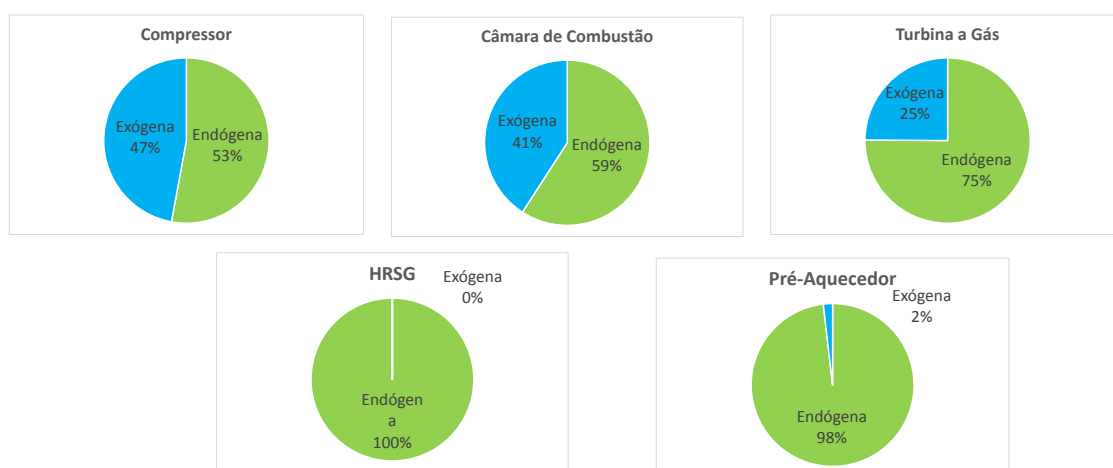


Figura 27. Destruição exérgica endógena e exógena para o ponto de menor custo.

Pode-se perceber que o componente que apresentou a maior parte da destruição endógena, em valores absolutos, foi a câmara de combustão. Já percentualmente, os componentes com maior percentual de destruição endógena foram a caldeira de

recuperação, o pré-aquecedor e a turbina a gás. Esse resultado indica que a maior parte da destruição exergética nesses componentes ocorre devido as suas próprias ineficiências.

Em seguida, foram obtidos os custos de destruição e das taxas de investimento endógenos e exógenos. A Tabela 14 e a Figura 28 indicam esses resultados.

Tabela 14. Custos de destruição e taxas de investimento endógenos e exógenos para ponto de menor custo.

	$\dot{Z}$ [\$/h]	$\dot{Z}^{EN}$ [\$/h]	$\dot{Z}^{EX}$ [\$/h]	$\dot{C}_D$ [\$/h]	$\dot{C}_D^{EN}$ [\$/h]	$\dot{C}_D^{EX}$ [\$/h]
<i>Compressor</i>	27,4	25,8	1,6	67,3	35,6	31,7
<i>Câmara de Combustão</i>	3,1	2,7	0,4	432,8	255,9	176,9
<i>Turbina a Gás</i>	46,1	42,1	3,9	59,7	44,8	14,8
<i>HRSG</i>	20,3	20,3	0,0	111,7	111,7	0,0
<i>Pré-Aquecedor</i>	16,3	15,3	1,0	51,0	50,1	0,9

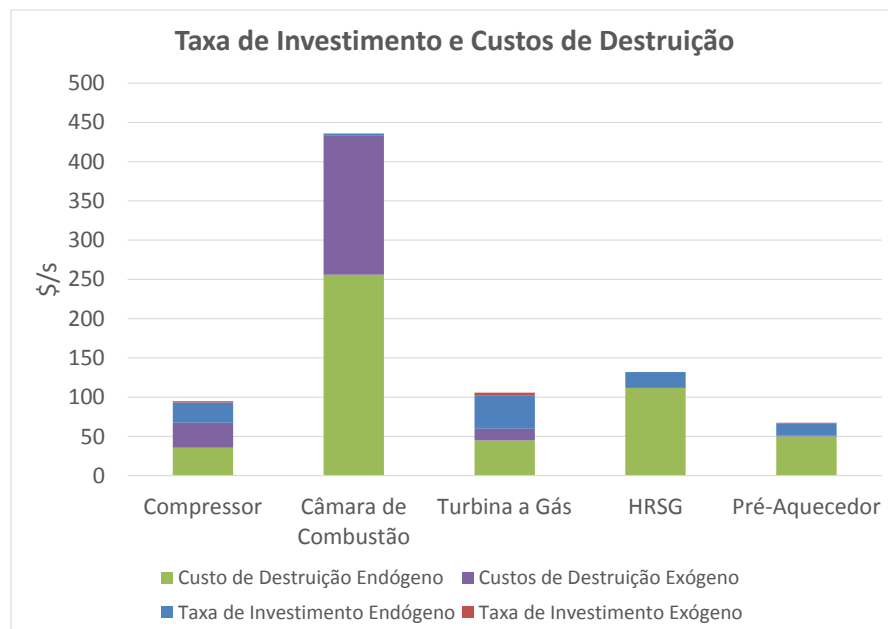


Figura 28. Custos de destruição e taxas de investimento endógenos e exógenos para ponto de menor custo.

Com relação aos custos, as taxas de investimento endógenos encontrados para a maioria dos componentes representam grande parte dos custos totais, indicando que quase a totalidade desses custos ocorrem devido às ineficiências dos próprios componentes. Já para os custos de destruição, a câmara de combustão é o componentes que apresenta o maior valor para os custos de destruição exógenos. O sistema operando

nesse ponto de menor custo, gasta-se 604,4\$/h em custos devido as ineficiências dos próprios componentes, o que corresponde a 72% dos custos totais do sistema.

Caso fosse estabelecida uma ordem de prioridade dos componentes com base nas informações obtidas com a análise exergoeconômica avançada, levando-se em conta a magnitude destruição exergética evitável, a ordem seria a seguinte: 1º Câmara de Combustão, 2º Pré-Aquecedor, 3º Compressor, 4º Turbina a Gás e 5º Caldeira de Recuperação. Já o critério de prioridade sendo a magnitude dos custos totais evitáveis, a ordem seria a seguinte: 1º Câmara de Combustão, 2º Compressor, 3º Turbina a Gás, 4º Pré-Aquecedor e 5º Caldeira de Recuperação.

## 5.2 Condição de Maior Eficiência

### 5.2.1 Otimização

No Anexo C são apresentadas os gráficos da evolução da função objetivo (eficiência exergética) em relação a chamada da função objetivo para as otimizações realizadas. A Tabela 15 apresenta os resultados finais para as variáveis de decisão em cada método e o valor da função objetivo.

Tabela 15. Resultado para cada Método Híbrido.

	Híbrido 1	Híbrido 2	Híbrido 3	Híbrido 4	Híbrido 5	Híbrido 6
$P_2/P_1$	12,87	23,06	19,80	16,14	21,76	20,57
$\eta_{AC}$	0,89	0,87	0,89	0,89	0,90	0,90
$T_3$	529,2	540,2	517,7	536,8	539,6	503,0
$\eta_{GT}$	0,90	0,90	0,90	0,88	0,88	0,90
$T_4$	1224,3	1220,0	1222,1	1211,8	1208,2	1186,1
<i>Eficiência</i>	0,57910	0,57505	0,58113	0,56952	0,57006	0,57317

Assim como feito para o ponto de menor custo, foram verificados o tempo de execução que cada método levou e o número de chamadas da função objetivo, conforme indicado nas Figuras 29 e 30. Como já era esperado, os métodos que levaram mais tempo e chamaram mais vezes a função objetivo foram os métodos híbridos 3 e 6 cujos algoritmos envolve o cálculo do hessiano da função.

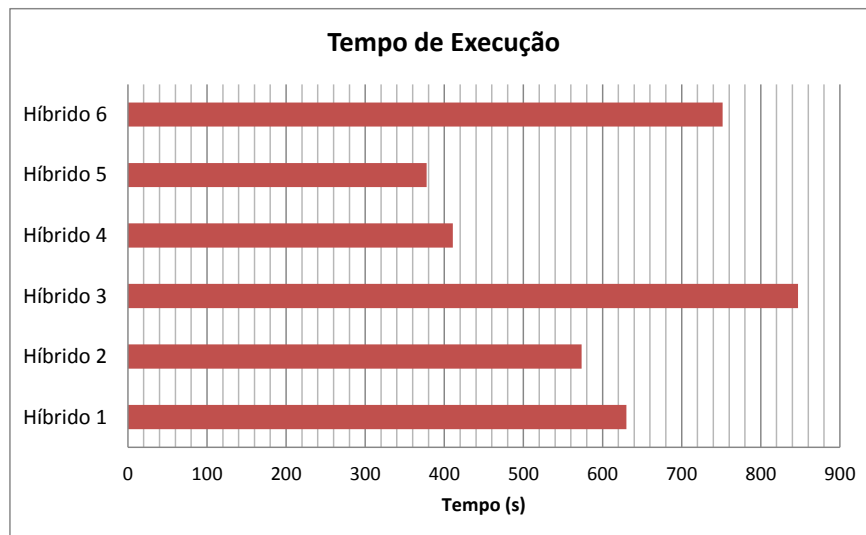


Figura 29. Comparação entre o tempo de execução de cada método.

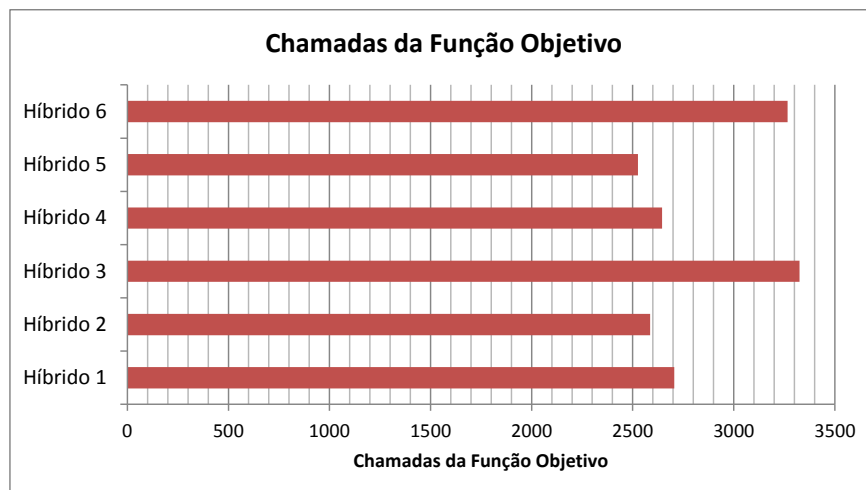


Figura 30. Comparação entre o número de chamadas da função objetivo de cada método.

A partir dos resultados encontrados indicados na Tabela 13, pode-se verificar que o método que atingiu o maior valor de eficiência exergética foi o híbrido 3, portanto, este ponto foi selecionado como de maior eficiência exergética para a análise exergoeconômica avançada.

### 5.2.2 Análise Exergoeconômica Convencional e Avançada

A seguir são apresentados os resultados da Análise Exergética Avançada para o sistema CGAM operando na condição de maior eficiência exergética. Assim como feito para o ponto de menor custo, inicialmente é feita análise exergética convencional, obtendo-se a destruição exergética, eficiência exergética e razão de destruição de



exergia para cada um dos componentes. Os resultados são apresentados na Tabela 16 e na Figura 31.

Tabela 16. Destruição exergetica para ponto de maior eficiência.

	$\dot{E}_F$ [MW]	$\dot{E}_P$ [MW]	$\dot{E}_D$ [MW]	$\varepsilon$	$y_D$
<i>Compressor</i>	36,41	34,75	1,67	0,95	0,05
<i>Câmara de Combustão</i>	114,03	91,18	22,86	0,80	0,69
<i>Turbina a Gás</i>	69,16	66,41	2,75	0,96	0,08
<i>HRSG</i>	17,77	12,77	5,00	0,72	0,15
<i>Pré-Aquecedor</i>	3,63	2,92	0,71	0,80	0,02

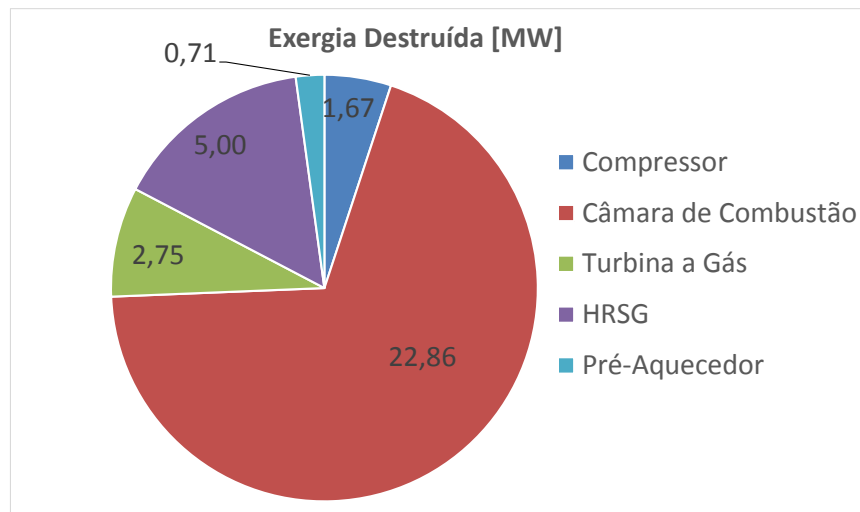


Figura 31. Destruição exergetica para ponto de maior eficiência.

Como é possível perceber, a câmara de combustão também é o componente que mais destrói a exergia do sistema, seguido pela caldeira de recuperação e a turbina. Assim como para o ponto de menor custo, a razão de destruição da câmara de combustão é a maior entre todos.

Em seguida, obteve-se os custos dos combustíveis, os custos dos produtos, os custos de destruição e de investimentos, o fator exergoeconômico e a razão relativa de custos para cada componente. A Tabela 17 e a Figura 32 apresentam tais resultados.

Tabela 17. Custos de destruição e taxas de investimento para ponto de maior eficiência.

	$\dot{C}_F$ [\$/h]	$\dot{C}_P$ [\$/h]	$\dot{C}_D$ [\$/h]	$\dot{Z}$ [\$/h]	$\dot{C}_D + \dot{Z}$ [\$/h]	$f$	$r$
<i>Compressor</i>	1172,9	1490,1	53,7	523,8	577,5	0,907	0,331
<i>Câmara de Combustão</i>	2666,7	2669,6	534,5	2,9	537,5	0,005	0,252
<i>Turbina a Gás</i>	2025,0	2139,2	80,4	114,2	194,6	0,587	0,100
<i>HRS</i>	520,3	545,3	146,4	25,0	171,4	0,146	0,459
<i>Pré-Aquecedor</i>	106,3	116,2	20,8	9,9	30,7	0,321	0,359

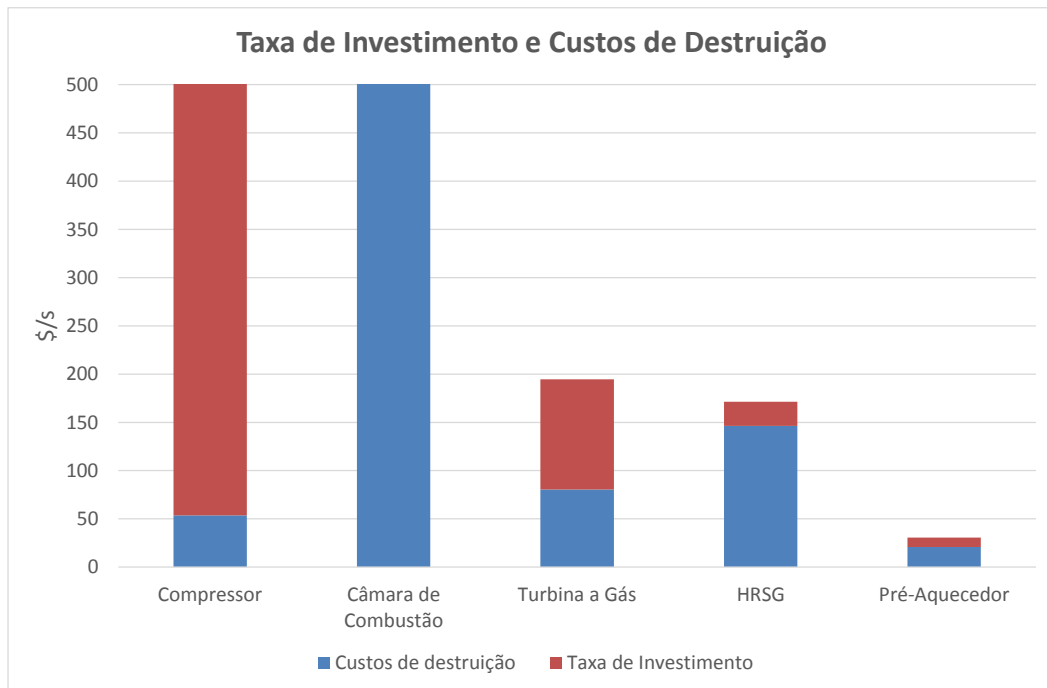


Figura 32. Custos de destruição e taxas de investimento para ponto de maior eficiência.

A partir dos resultados encontrados, é possível verificar que o componente que apresenta o maior custo de investimento para esta condição é o compressor e o que apresenta o maior custo de destruição é a câmara de combustão. As participações dos custos de investimento no custo total para câmara de combustão e da caldeira são as menores no sistema, representando de 0,5% e 14,6%, respectivamente. Já para a compressor, os investimentos foram muito mais significativos, pois como o valor da eficiência isentrópica para este componente é alto nesta condição, o custo de investimento se mostrou bem elevado.

Estabelecendo uma ordem de prioridade para melhoria do sistema, priorizando-se os componentes em função da magnitude destruição exergética, a ordem seria a

seguinte: 1º Câmara de Combustão, 2º Caldeira de Recuperação, 3º Turbina a Gás, 4º Compressor e 5º Pré-Aquecedor. Se o critério de prioridade fosse a magnitude dos custos totais, a ordem passaria a ser a seguinte: 1º Compressor, 2º Câmara de Combustão, 3º Turbina a Gás, 4º Caldeira de Recuperação e 5º Pré-Aquecedor.

Diferentemente do observado para o ponto de menor custo, no ponto de maior eficiência, a câmara deixa de ser o componente principal quando o critério é o custo total. Isso se deve ao fato de que na condição de máxima eficiência, o custo de investimento encontrado para o compressor é elevado.

Após a análise exergoeconômica convencional, prossegue-se para a outra parte da análise exérgica avançada, onde as parcelas evitáveis/inevitáveis e endógena/exógena da destruição, custos de destruição e investimentos são obtidos. Inicialmente, obteve-se as destruições e custos evitáveis e inevitáveis do sistema. A Tabelas 18 e a Figura 33 apresentam tais resultados.

Tabela 18. Destruição exérgica evitável e inevitável para o ponto de maior eficiência.

	$\dot{E}_D$ [MW]	$(\dot{E}_D/\dot{E}_P)^{UN}$	$\dot{E}_D^{AV}$ [MW]	$\dot{E}_D^{UN}$ [MW]
<i>Compressor</i>	1,67	0,04	0,13	1,53
<i>Câmara de Combustão</i>	22,86	0,19	5,73	17,12
<i>Turbina a Gás</i>	2,75	0,04	0,20	2,55
<i>HRS</i>	5,00	0,37	0,21	4,79
<i>Pré-Aquecedor</i>	0,71	0,15	0,26	0,45

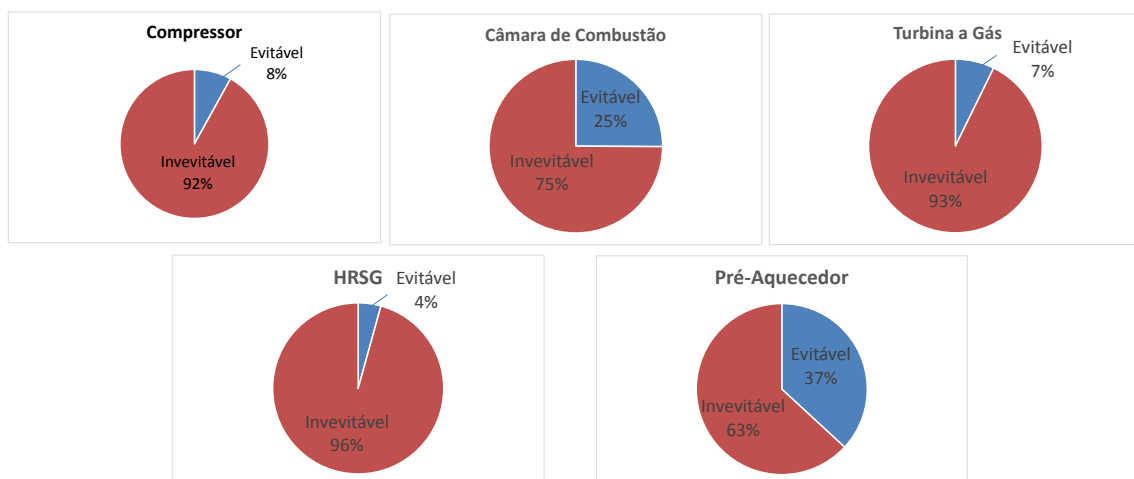


Figura 33. Destruição exérgica evitável e inevitável para o ponto de maior eficiência.

Como é possível notar, diferentemente do ponto de menor custo, os componentes que apresentam maiores potenciais de melhoria, em valores percentuais, são o pré-aquecedor e a câmara de combustão. Já em valores absolutos, a quantidade de exergia destruída evitável da câmara de combustão se mostrou muito superior a todas demais destruições evitáveis (5,73 MW). Nota-se que o sistema operando nessa condição pode evitar 6,55 MW de destruição exergética.

Em seguida foram obtidas as parcelas evitáveis e inevitáveis dos custos de destruição e taxas de investimentos. A Tabela 19 e Figura 34 apresentam tais resultados.

Tabela 19. Custos de destruição e taxas de investimento evitáveis e inevitáveis para ponto de maior eficiência.

	$\dot{Z}$ [\$/h]	$\dot{Z}^{AV}$ [\$/h]	$\dot{Z}^{UN}$ [\$/h]	$\dot{C}_D$ [\$/h]	$\dot{C}_D^{AV}$ [\$/h]	$\dot{C}_D^{UN}$ [\$/h]	$\dot{Z}^{AV} + \dot{C}_D^{AV}$ [\$/h]	$f^*$
<i>Compressor</i>	523,8	504,5	19,2	53,7	4,3	49,4	508,8	0,992
<i>Câmara de Combustão</i>	2,9	1,6	1,3	534,5	134,1	400,4	135,7	0,012
<i>Turbina a Gás</i>	114,2	99,5	14,7	80,4	5,8	74,5	105,4	0,945
<i>HRS</i>	25,0	14,8	10,2	146,4	6,3	140,2	21,0	0,701
<i>Pré-Aquecedor</i>	9,9	0,02	9,8	20,8	7,7	13,1	7,7	0,003

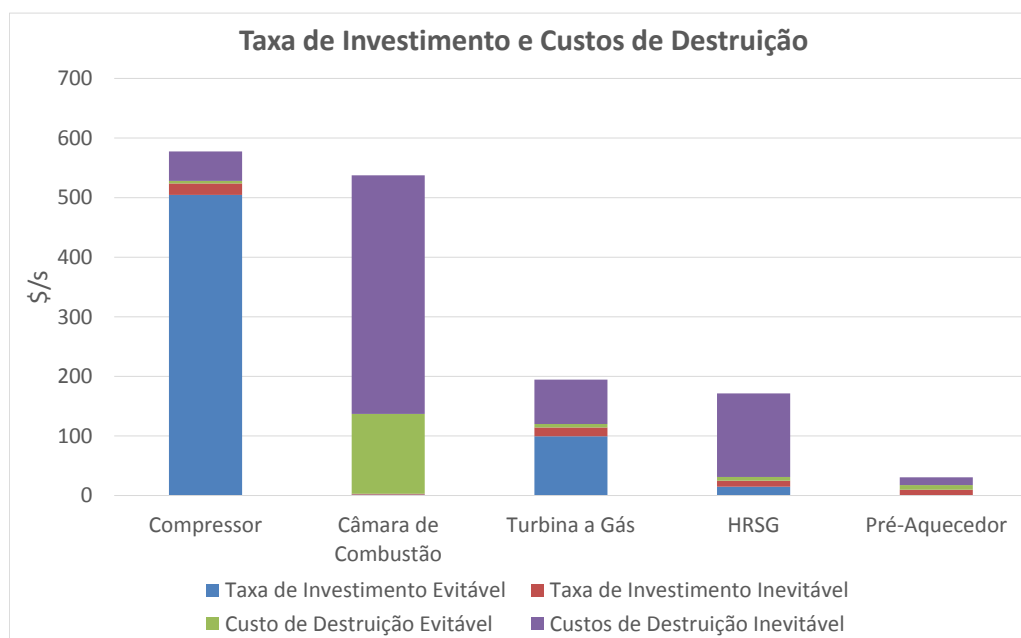


Figura 34. Custos de destruição e taxas de investimento evitáveis e inevitáveis para ponto de maior eficiência.

Diferentemente do ponto de menor custo, o componente que apresentou a maior parcela de custos evitáveis foi o compressor, seguido da câmara de combustão. Ao verificar os fatores exergoeconômicos, levando-se em conta apenas as parcelas evitáveis

dos componentes, percebe-se que as contribuições dos investimentos evitáveis no custo evitável total para o compressor e a turbina são as maiores. No total, para o sistema operando nessa condição cerca de 778,7 \$/h podem ser evitados.

Na sequência obteve-se as destruições exergéticas endógenas e exógenas para os componentes, assim como seus custos. As destruições exergéticas foram obtidas segundo o Método de Engenharia, conforme descrito no item 2.2.2. Os gráficos obtidos utilizando esse método são indicados nas Figuras 35, 36, 37 e 38.

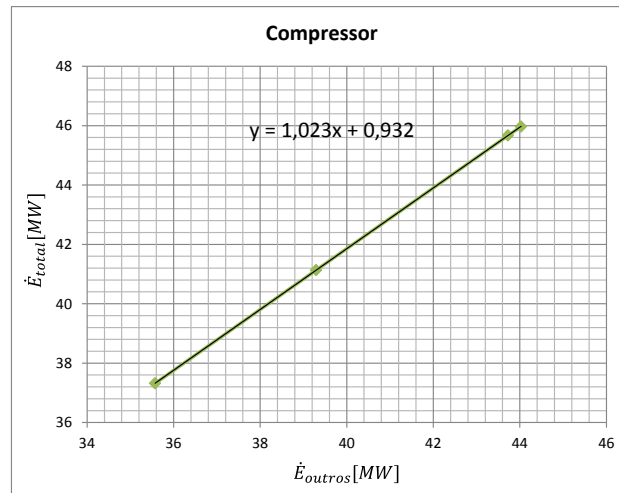


Figura 35. Determinação da destruição exergética endógena do Compressor.

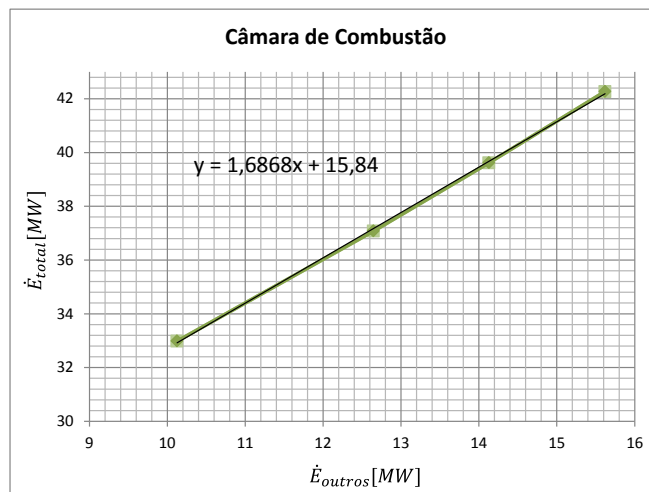


Figura 36. Determinação da destruição exergética endógena da Câmara de Combustão.

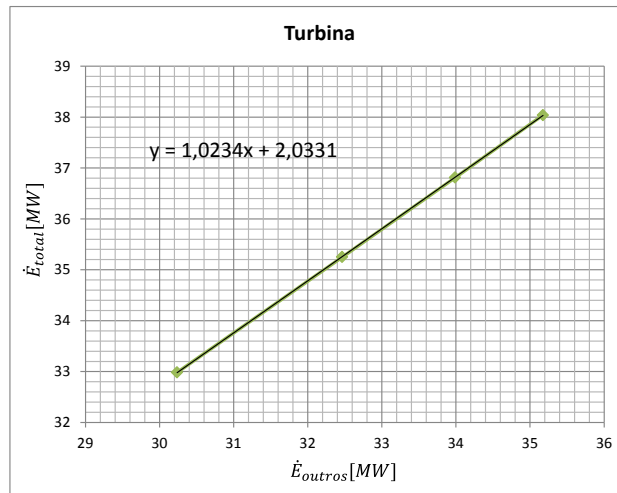


Figura 37. Determinação da Parcela Endógena Turbina a Gás.

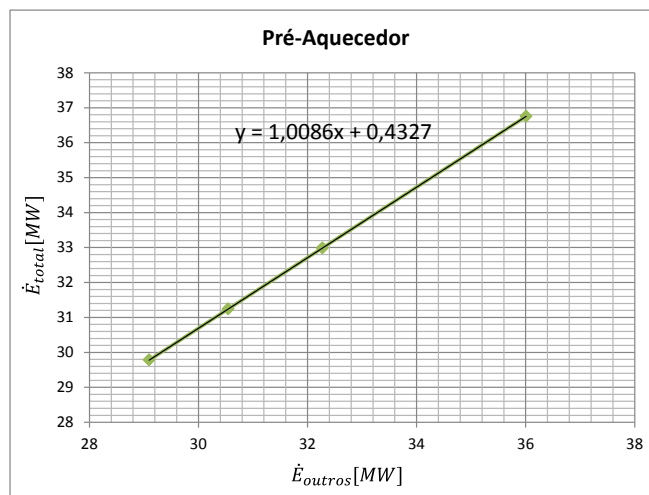


Figura 38. Determinação da destruição exérgica endógena do Pré-Aquecedor.

A Tabela 20 e a Figura 39 indicam as parcelas endógenas e exógenas para as destruições exérgicas dos componentes do sistema.

Tabela 20. Destruição exérgica endógena e exógena para o ponto de maior eficiência.

	$\dot{E}_D$ [MW]	$\dot{E}_D^{EN}$ [MW]	$\dot{E}_D^{EX}$ [MW]
<i>Compressor</i>	1,67	0,93	0,73
<i>Câmara de Combustão</i>	22,86	15,84	7,02
<i>Turbina a Gás</i>	2,75	2,03	0,71
<i>HRSG</i>	5,00	5,00	0,00
<i>Pré-Aquecedor</i>	0,71	0,43	0,28

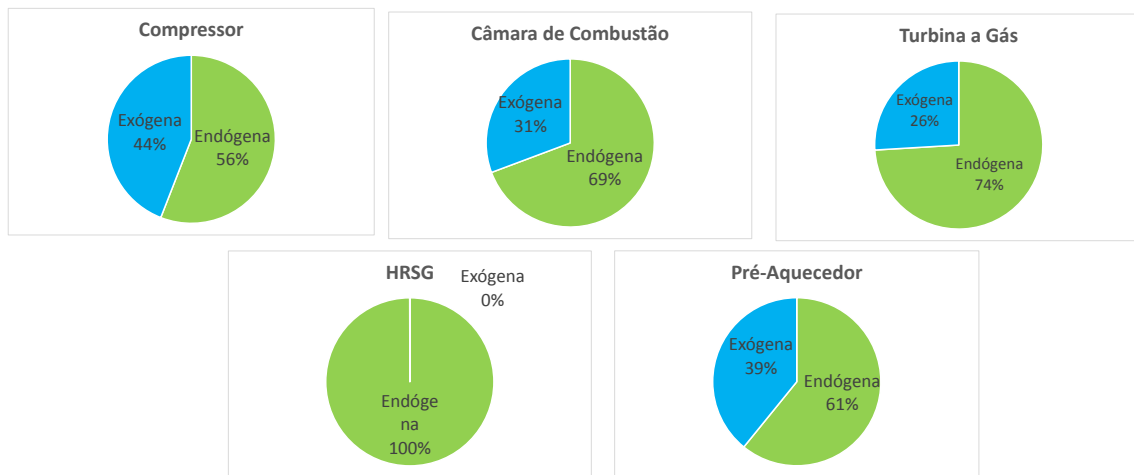


Figura 39. Destruição exergetica endógena e exógena para o ponto de maior eficiência.

O componente que apresentou a maior parte da destruição endógena, em valores absolutos, também foi a câmara de combustão. Em valores percentuais, os componentes com maior parcela endógena de destruição foram a caldeira de recuperação e a turbina a gás. Esse resultado aponta para a pouca dependência do desempenho desses componentes em relação aos demais.

Na sequência, foram obtidos os custos de destruição e taxas de investimento endógenos e exógenos. A Tabela 21 e a Figura 40 indicam esses resultados.

Tabela 21. Custos de destruição e taxas de investimento endógenos e exógenos para ponto de maior eficiência.

	$\dot{Z}$ [\$ /h]	$\dot{Z}^{EN}$ [\$ /h]	$\dot{Z}^{EX}$ [\$ /h]	$\dot{C}_D$ [\$ /h]	$\dot{C}_D^{EN}$ [\$ /h]	$\dot{C}_D^{EX}$ [\$ /h]
<i>Compressor</i>	523,8	519,5	4,3	53,7	30,0	23,7
<i>Câmara de Combustão</i>	2,9	2,9	0,1	534,5	370,4	164,1
<i>Turbina a Gás</i>	114,2	112,3	1,9	80,4	59,5	20,9
<i>HRSG</i>	25,0	25,0	0,0	146,4	146,4	0,0
<i>Pré-Aquecedor</i>	9,9	9,8	0,1	20,8	12,7	8,2

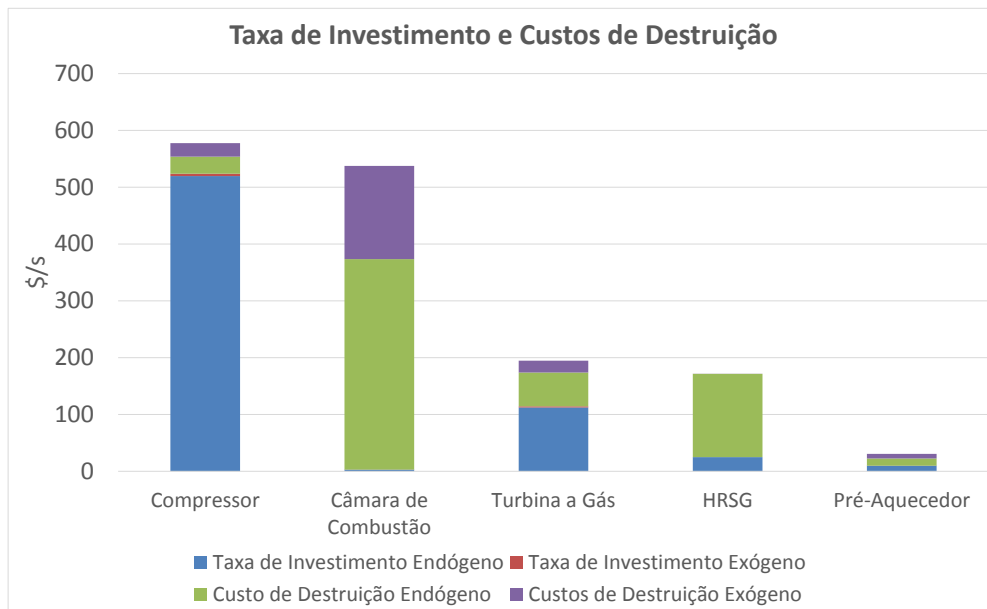


Figura 40. Custos de destruição e taxas de investimento endógenos e exógenos para ponto de maior eficiência.

Com relação aos custos, assim como obtido na condição de menor custo, os custos de investimento endógenos encontrados para a maioria dos componentes representam grande parte dos custos totais. Já para os custos de destruição, o compressor e câmara de combustão apresentaram os maiores valores para os custos de destruição exógenos. O sistema operando na condição de maior eficiência gasta 1288,5\$/h devido as ineficiências dos próprios componentes, o que corresponde a 85,2% dos custos totais do sistema. Portanto, grande parte dos custos totais são causados pelas ineficiências dos componentes individualmente.

Pode-se estabelecer uma ordem de prioridade de melhoria dos componentes com base nas informações obtidas com a análise exergoeconômica avançada. Utilizando como critério a magnitude destruição exergética evitável, a ordem para o sistema operando na condição de maior eficiência seria a seguinte: 1º Câmara de Combustão, 2º Pré-Aquecedor, 3º Caldeira de Recuperação, 4º Turbina a Gás e 5º Compressor. Já considerando como critério de prioridade a magnitude dos custos totais evitáveis, a ordem seria a seguinte: 1º Compressor, 2º Câmara de Combustão, 3º Turbina a Gás, 4º Caldeira de Recuperação e 5º Pré-Aquecedor.



### 5.3 Condição Arbitrária

#### 5.3.1 Análise Exergoeconômica Convencional e Avançada

A seguir são apresentados os resultados da Análise Exergética Avançada para o sistema CGAM no ponto arbitrário. Assim como feito anteriormente, primeiramente é feita uma análise exergética convencional, onde são obtidas a destruição exergética, eficiência exergética e razão de destruição de exergia para cada um dos componentes. Os resultados são apresentados na Tabela 22 e na Figura 41.

Tabela 22. Destruição exergética para ponto arbitrário.

	$\dot{E}_F$ [MW]	$\dot{E}_P$ [MW]	$\dot{E}_D$ [MW]	$\varepsilon$	$y_D$
<i>Compressor</i>	45,55	40,74	4,81	0,89	0,095
<i>Câmara de Combustão</i>	169,91	139,97	29,93	0,82	0,589
<i>Turbina a Gás</i>	81,54	75,55	5,99	0,93	0,118
<i>HRSG</i>	19,21	12,77	6,44	0,66	0,127
<i>Pré-Aquecedor</i>	32,93	29,32	3,61	0,89	0,071

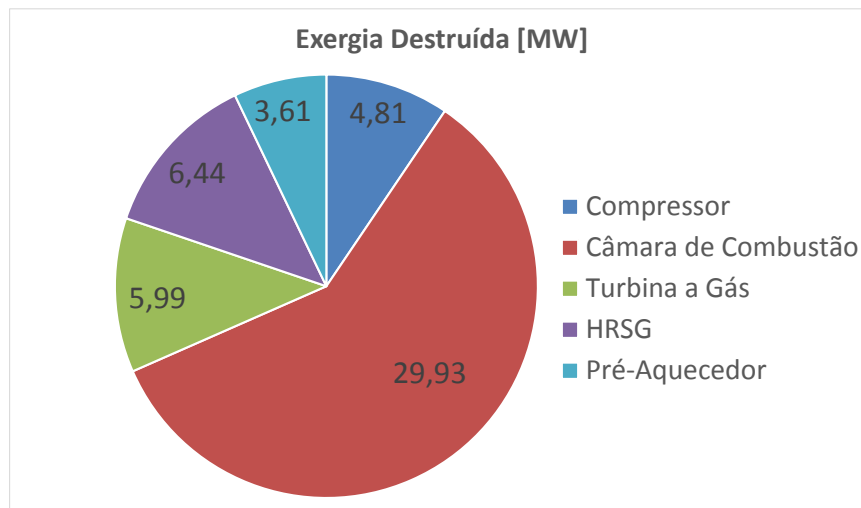


Figura 41. Destruição exergética para ponto arbitrário.

É possível verificar que a câmara de combustão também é o componente que mais destrói a exergia do sistema, seguido pela caldeira de recuperação e a turbina. Assim como obtido nas condições anteriores, a razão de destruição da câmara de combustão é a maior entre todos os componentes.

Na sequência foram obtidos os custos dos combustíveis, custo dos produtos, custos de destruição e de investimentos, fator exergoeconômico e razão relativa de custos para cada componente. A Tabela 23 e a Figura 42 apresentam tais resultados.

Tabela 23. Custos de destruição e taxas de investimento para ponto arbitrário.

	$\dot{C}_F$ [\$/h]	$\dot{C}_P$ [\$/h]	$\dot{C}_D$ [\$/h]	$\dot{Z}$ [\$/h]	$\dot{C}_D + \dot{Z}$ [\$/h]	$f$	$r$
<i>Compressor</i>	960,3	656,1	101,4	23,7	125,1	0,189	-0,2
<i>Câmara de Combustão</i>	2704,6	2707,3	476,5	2,7	479,1	0,006	0,2
<i>Turbina a Gás</i>	1577,1	1592,7	115,8	15,6	131,4	0,119	0,1
<i>HRS</i>	371,5	388,9	124,6	17,3	141,9	0,122	0,6
<i>Pré-Aquecedor</i>	636,9	662,1	69,9	25,2	95,0	0,265	0,2

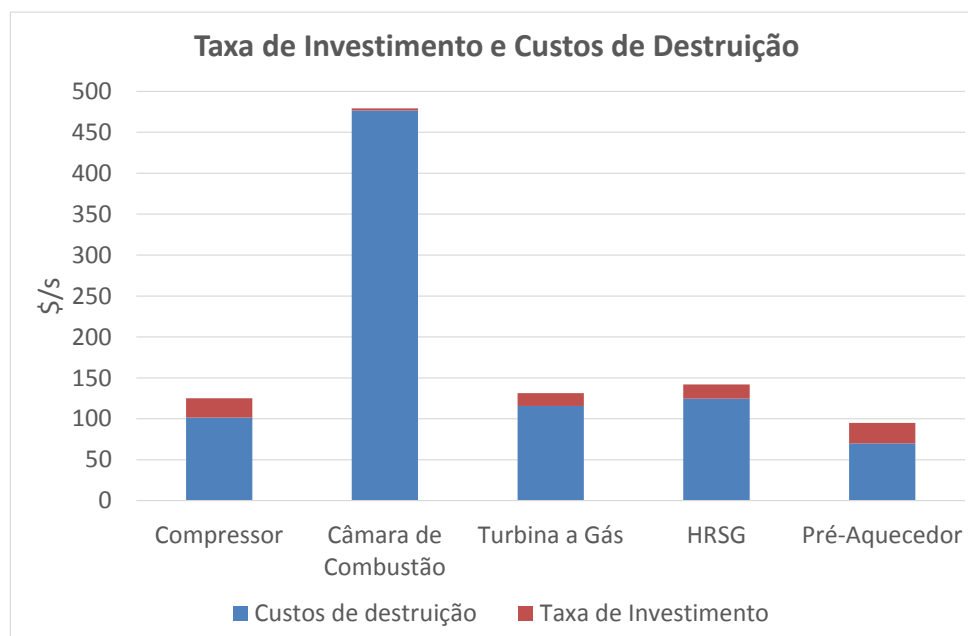


Figura 42. Custos de destruição e taxas de investimento para ponto arbitrário.

Analisando-se os resultados, nota-se que o componente que apresenta o maior custo de investimento para esta condição é o pré-aquecedor e o que apresenta o maior custo de destruição é a câmara de combustão. Pode-se perceber ainda que as participações dos custos de investimento no custo total para câmara de combustão e da turbina são as menores no sistema, representando de 0,6% dos custos totais para a câmara e 11,9% para a Turbina.

Estabelecendo uma ordem de prioridade de melhoria dos componentes levando-se em conta a magnitude destruição exergética, a ordem de prioridade para essa condição seria a seguinte: 1º Câmara de Combustão, 2º Caldeira de Recuperação, 3º Turbina a Gás, 4º Compressor e 5º Pré-Aquecedor. Se o critério de prioridade fosse a magnitude dos custos totais, a ordem passaria a ser a seguinte: 1º Câmara de Combustão, 2º Caldeira de Recuperação, 3º Turbina a Gás, 4º Compressor e 5º Pré-Aquecedor.

Em seguida, encaminha-se para a outra parte da análise exergética avançada, onde as parcelas evitáveis/inevitáveis e endógena/exógena da destruição, custos de destruição e investimentos são obtidos. Inicialmente, obteve-se as destruições e custos evitáveis e inevitáveis do sistema. A Tabelas 24 e a Figura 43 apresentam tais resultados.

Tabela 24. Destruição exergética evitável e inevitável para o ponto arbitrário.

	$\dot{E}_D$ [MW]	$(\dot{E}_D/\dot{E}_P)^{UN}$	$\dot{E}_D^{AV}$ [MW]	$\dot{E}_D^{UN}$ [MW]
<i>Compressor</i>	4,81	0,06	2,47	2,34
<i>Câmara de Combustão</i>	29,93	0,18	4,29	25,64
<i>Turbina a Gás</i>	5,99	0,03	3,63	2,36
<i>HRSG</i>	6,44	0,47	0,38	6,06
<i>Pré-Aquecedor</i>	3,61	0,04	2,34	1,28

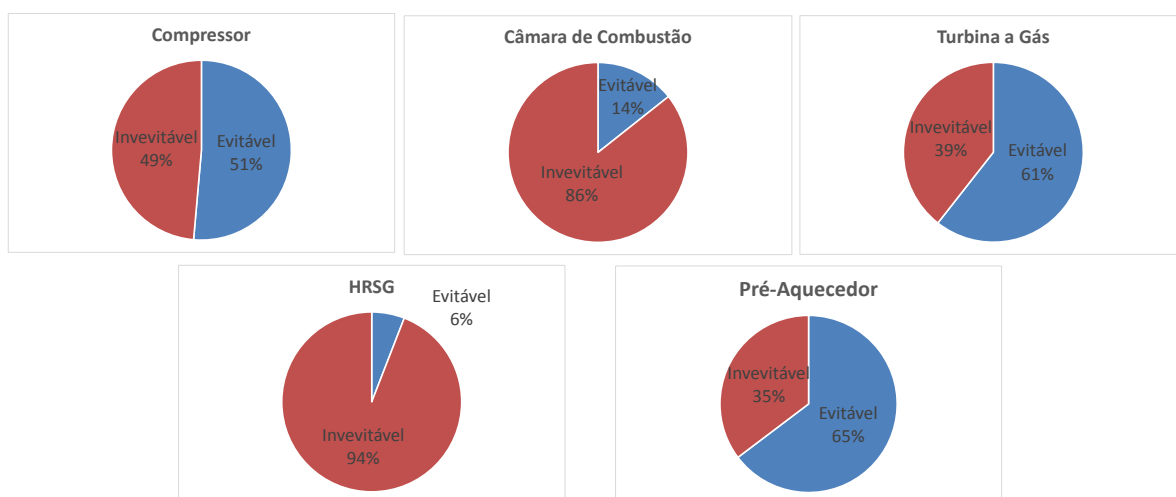


Figura 43. Destruição exergética evitável e inevitável para o ponto arbitrário.

Os componentes que apresentam maiores potenciais de melhoria, em valores percentuais, são a turbina a gás e o pré-aquecedor. Entretanto, tomando em valores absolutos, a quantidade de exergia destruída evitável da câmara de combustão é superior às demais destruições evitáveis (4,29 MW), seguida pela turbina a gás. O sistema operando nessa condição pode evitar 13,11MW.

Após a obtenção das parcelas evitáveis e inevitáveis da destruição de exergia, foram obtidas as parcelas evitáveis e inevitáveis dos custos de destruição e taxas de investimentos. A Tabela 25 e Figura 44 apresentam tais resultados.

Tabela 25. Custos de destruição e taxas de investimento evitáveis e inevitáveis para ponto arbitrário.

	$\dot{Z}$ [\$/h]	$\dot{Z}^{AV}$ [\$/h]	$\dot{Z}^{UN}$ [\$/h]	$\dot{C}_D$ [\$/h]	$\dot{C}_D^{AV}$ [\$/h]	$\dot{C}_D^{UN}$ [\$/h]	$\dot{Z}^{AV} + \dot{C}_D^{AV}$ [\$/h]	$f^*$
<i>Compressor</i>	23,7	12,7	10,9	101,4	52,1	49,3	64,9	0,196
<i>Câmara de Combustão</i>	2,7	2,3	0,3	476,5	68,3	408,2	70,6	0,033
<i>Turbina a Gás</i>	15,6	6,1	9,5	115,8	70,2	45,6	76,3	0,080
<i>HRSG</i>	17,3	4,2	13,1	124,6	7,3	117,2	11,6	0,365
<i>Pré-Aquecedor</i>	25,2	1,3	23,9	69,9	45,2	24,7	46,5	0,028

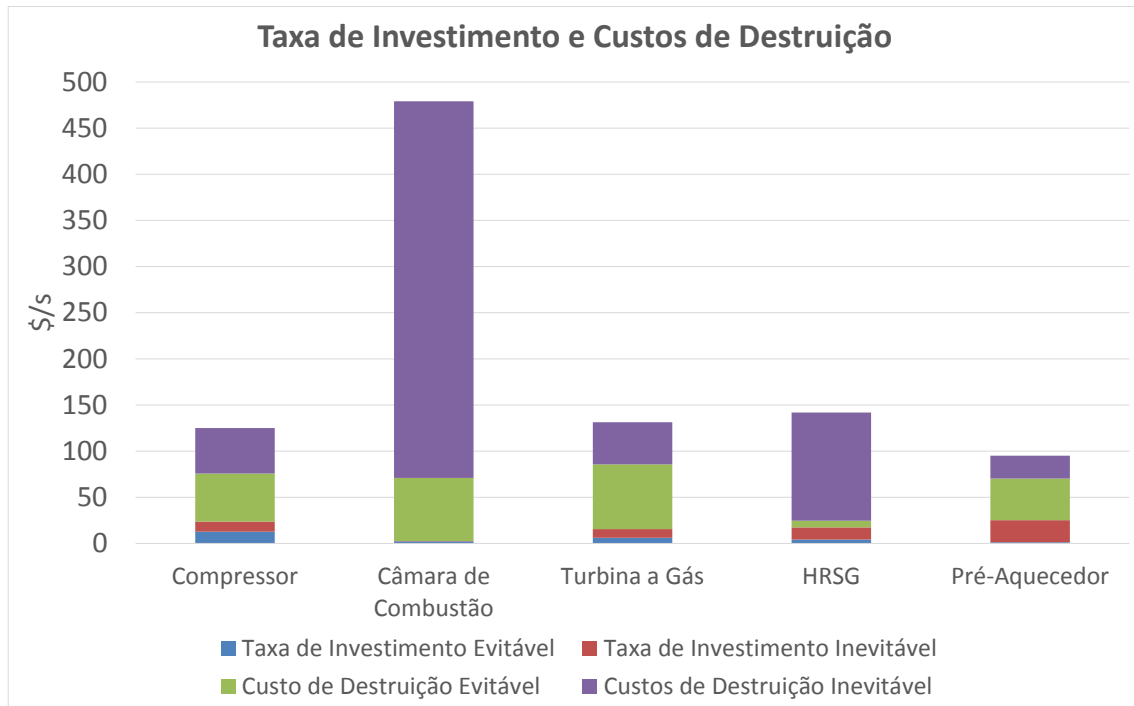


Figura 44. Custos de destruição e taxas de investimento evitáveis e inevitáveis para ponto arbitrário.

Como é possível perceber, o componente que apresentou a maior parcela de custos evitáveis foi a turbina a gás, seguido da câmara de combustão. Analisando fatores exergergoeconômico, levando-se em conta apenas as parcelas evitáveis dos componentes, percebe-se que as contribuições dos investimentos evitáveis no custo evitável total para a caldeira e o compressor são os maiores. No total, para o sistema operando nessa condição cerca de 269,9 \$/h podem ser evitados.

Na sequência as destruições exergeticas endógenas e exógenas para os componentes foram obtidas, bem como seus custos. Os gráficos obtidos utilizando o método de engenharia são indicados nas Figuras 45, 46, 47 e 48.

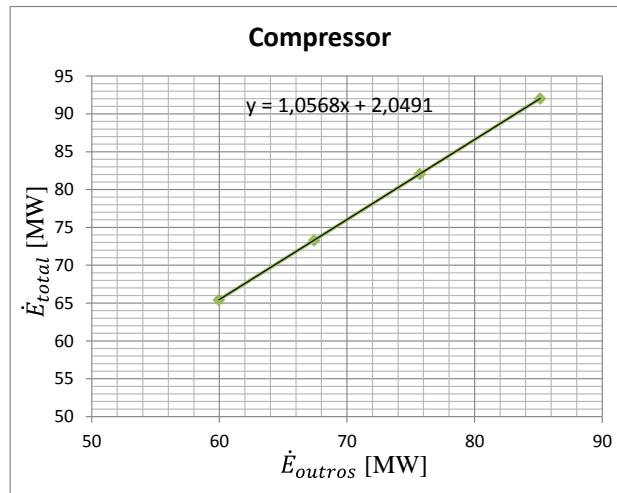


Figura 45. Determinação da destruição exergética endógena do Compressor.

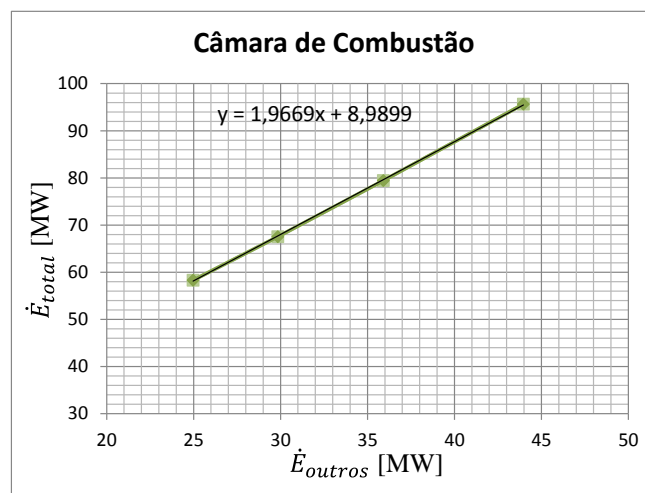


Figura 46. Determinação da destruição exergética endógena da Câmara de Combustão.

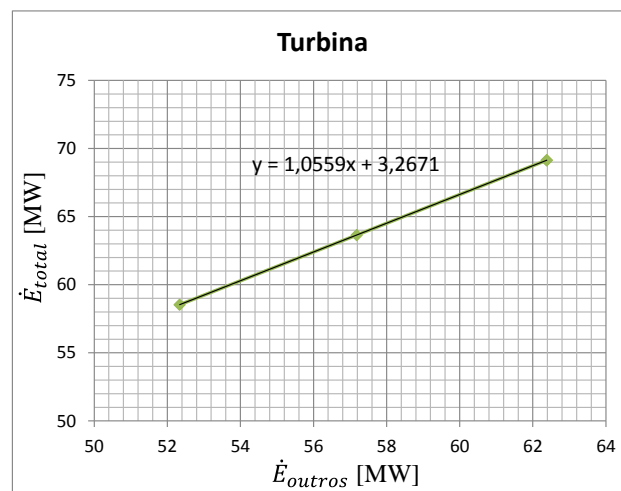


Figura 47. Determinação da Parcela Endógena Turbina a Gás.

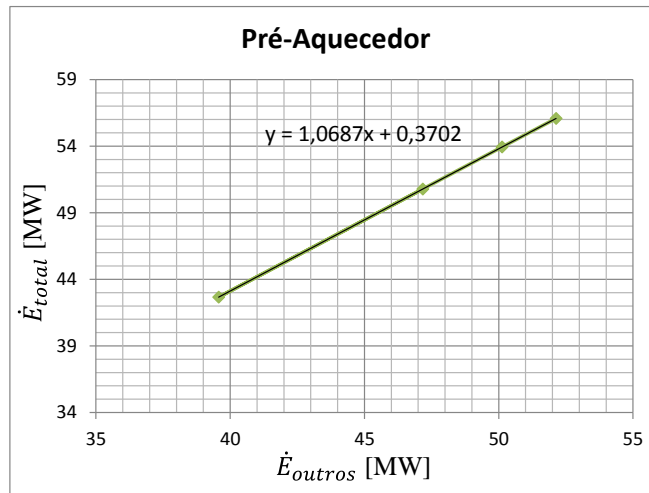


Figura 48. Determinação da destruição exérgica endógena do Pré-Aquecedor.

A Tabela 26 e a Figura 49 indicam as parcelas endógenas e exógenas para as destruições exérgicas dos componentes do sistema.

Tabela 26. Destruição exérgica endógena e exógena para o ponto arbitrário.

	$\dot{E}_D$ [MW]	$\dot{E}_D^{EN}$ [MW]	$\dot{E}_D^{EX}$ [MW]
<i>Compressor</i>	4,81	2,05	2,76
<i>Câmara de Combustão</i>	29,93	8,99	20,94
<i>Turbina a Gás</i>	5,99	3,27	2,72
<i>HRSG</i>	6,44	6,44	0,00
<i>Pré-Aquecedor</i>	3,61	0,37	3,24

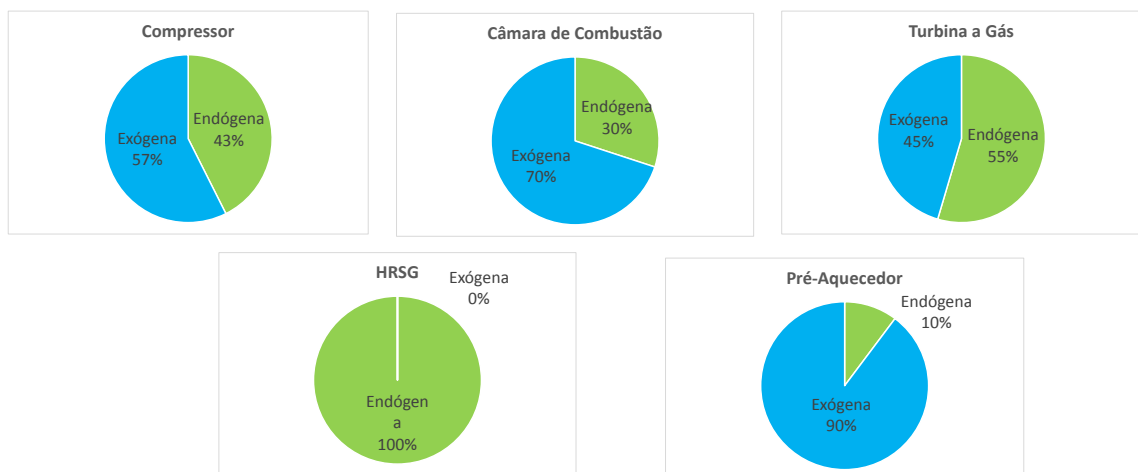


Figura 49. Destruição exérgica endógena e exógena para o ponto arbitrário.

É possível verificar que os componentes que apresentam a maior parte da destruição endógena, em valores absolutos, são a câmara de combustão e a caldeira de

recuperação. Em valores percentuais, os componentes com maior parcela endógena de destruição foram a caldeira de recuperação e a turbina a gás, indicando a pouca dependência do desempenho desses componentes em relação aos demais. O componente que se mostrou mais sensíveis às ineficiências dos demais nessa condição de operação foi o pré-aquecedor, pois cerca de 90% da destruição da sua exergia é motivada pela ineficiência dos outros componentes.

Na sequência, os custos de destruição e taxas de investimento endógenos e exógenos foram obtidos. A Tabela 27 e a Figura 50 indicam esses resultados.

Tabela 27. Custos de destruição e taxas de investimento endógenos e exógenos para ponto arbitrário.

	$\dot{Z}$ [\$/h]	$\dot{Z}^{EN}$ [\$/h]	$\dot{Z}^{EX}$ [\$/h]	$\dot{C}_D$ [\$/h]	$\dot{C}_D^{EN}$ [\$/h]	$\dot{C}_D^{EX}$ [\$/h]
<i>Compressor</i>	23,7	17,5	6,1	101,4	43,2	58,2
<i>Câmara de Combustão</i>	2,7	1,9	0,8	476,5	143,1	333,4
<i>Turbina a Gás</i>	15,6	13,2	2,4	115,8	63,2	52,6
<i>HRSG</i>	17,3	17,3	0,0	124,6	124,6	0,0
<i>Pré-Aquecedor</i>	25,2	20,7	4,4	69,9	7,2	62,7

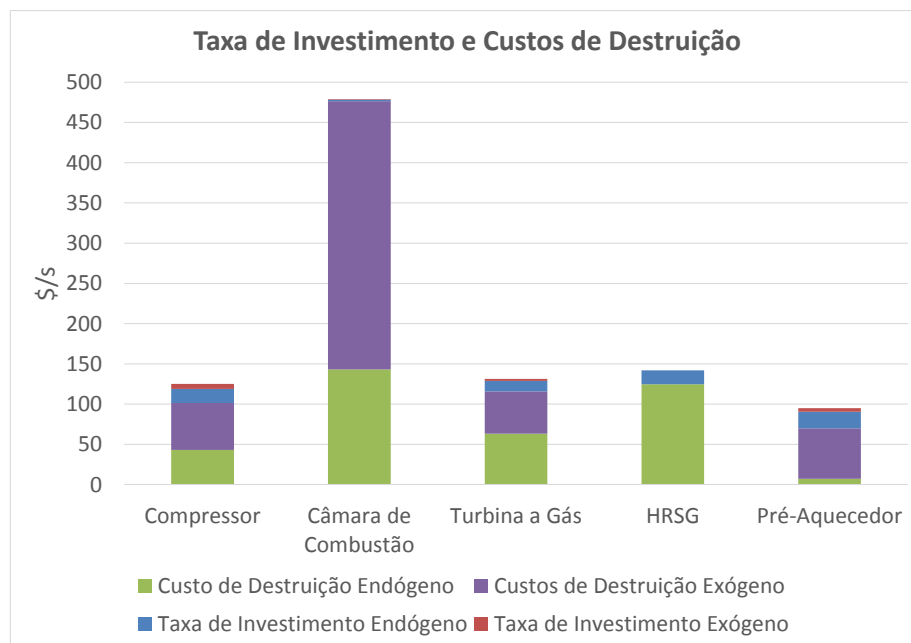


Figura 50. Custos de destruição e taxas de investimento endógenos e exógenos para ponto de arbitrário.

Pode-se perceber que os custos de investimento endógenos encontrados para a maioria dos componentes representam grande parte dos custos totais. Já para os custos de destruição, em alguns componentes as parcelas exógenas foram maiores do que as

parcelas endógenas, como ocorrido no compressor, câmara de combustão e pré-aquecedor, indicando que a maior parte da destruição exergética dos demais componentes. O sistema operando no ponto arbitrário gasta 451,9\$/h devido as ineficiências dos próprios componentes, o que corresponde a 46% dos custos totais do sistema. Portanto, diferentemente das condições anteriores, aproximadamente metade dos custos totais são causados pela ineficiências dos componentes individualmente e a outra metade pelos demais.

Estabelecendo uma ordem de prioridade de melhoria dos componentes com base nessas informações obtidas com a análise exergoeconômica avançada, utilizando como critério a magnitude destruição exergética evitável, a ordem para o sistema operando nessa condição arbitrária seria a seguinte: 1º Câmara de Combustão, 2º Turbina a Gás, 3º Compressor, 4º Pré-Aquecedor e 5º Caldeira de Recuperação. Adotando o critério de prioridade como sendo a magnitude dos custos totais evitáveis, a ordem seria a seguinte: 1º Turbina a Gás, 2º Câmara de Combustão, 3º Compressor, 4º Pré-Aquecedor e 5º Caldeira de Recuperação.

#### **5.4 Comparação dos Resultados**

Inicialmente serão comparados os resultados das análises exergoeconômicas avançadas em cada condição de operação. Dado que a condição de menor custo é mais relevante do ponto de vista prático para operação de uma planta, tal condição foi confrontada com a arbitrária e a de maior eficiência. Em seguida será apresentada uma comparação entre os resultados da análise exergoeconômica convencional com a análise exergoeconômica avançada obtidos em cada condição de operação e será apresentada uma sugestão de trabalho futuro para o acoplamento da análise exergoeconômica avançada na otimização do sistema.

##### **5.4.1 Comparação dos Resultados da Análise Exergoeconômica Convencional e Avançada nas diferentes Condições de Operação**

Inicialmente foi feita uma comparação entre os resultados da análise exergoeconômica convencional e avançada do sistema operando com menor custo (Ponto Econômico) e operando na condição arbitrária (Ponto Arbitrário). A Tabela 28 mostra a diferença percentual entre as variáveis termodinâmicas, custo e eficiência exergética entre tais condições.



Tabela 28. Comparação entre a condição de menor custo e a arbitrária.

	<b>Pto Econômico</b>	<b>Pto Arbitrário</b>	<b>Diferença</b>
$P_2/P_1$	9,46	8,0	18,2%
$\eta_{AC}$	0,83	0,80	3,6%
$T_3$	600,4	626,85	4,2%
$\eta_{GT}$	0,88	0,80	10,1%
$T_4$	1210,9	1126,85	7,5%
<i>Custo (\$/s)</i>	0,33948	0,40858	16,9%
<i>Eficiência Exergética</i>	0,55485	0,44449	24,8%

Como é possível perceber, a diferença percentual máxima entre as variáveis foi de 18%, enquanto que o custo e a eficiência exergética aumentaram em 16,9% e 24,8%, respectivamente. Inicialmente analisando os resultados da análise exergoeconômica convencional, verificou-se que, para ambas condições de operação, a câmara de combustão é o componente que mais destrói exergia do sistema, representando 65% e 59% para o ponto de menor custo e o ponto arbitrário, respectivamente (Figuras 19 e 41). Notou-se ainda que a magnitude da destruição de exergia foi bem distinta nas condições, uma vez que no ponto de menor custo o sistema destrói 36 MW de exergia e no arbitrário, 50,7 MW (aproximadamente 40,8% maior), conforme observado pelas Tabelas 9 e 22.

Com relação aos custos de destruição e taxas de investimento, verificou-se que os valores encontrados para os fatores exergoeconômicos foram um pouco diferentes, indicando que o peso do investimento nos custos totais do componente foi distinto. Apesar desse resultado, é notório que em ambos os casos a contribuição dos investimentos nos custos da Câmara de Combustão foi ínfima, sendo 0,7% para o ponto de menor custo e 0,6% para o ponto arbitrário (Tabelas 10 e 23).

Prosseguindo-se para a análise exergoeconômica avançada, mais especificamente os valores obtidos nas parcelas evitáveis e inevitáveis das destruições exergéticas, verificou-se que o potencial de melhoria dos componentes entre as duas condições foi diferente. Para o ponto de menor custo, o compressor e o pré-aquecedor foram os componentes com maior potencial, já para o ponto arbitrário a turbina a gás e o pré-aquecedor apresentaram maior potencial (Figuras 21 e 43). Esses resultados indicam que esses componentes são os que apresentam percentualmente a maior fração de exergia destruída evitável dentre os demais componentes.

Analisando as parcelas evitáveis de destruição em valores absolutos, conforme indicado nas Tabelas 11 e 24, observou-se que os componentes com maior potencial em ambos os casos é a câmara de combustão, seguido do pré-aquecedor, para o ponto de menor custo, e seguido da Turbina a Gás, para o ponto arbitrário. Verificou-se que o sistema CGAM operando na condição de menor custo pode evitar 7,41 MW de destruição exergética enquanto que o ponto arbitrário pode evitar 13,11 MW, ou seja, em valor absoluto, o ponto arbitrário tem um potencial de melhoria aproximadamente 77% maior que o ponto de menor custo.

Com relação às parcelas endógenas e exógenas de destruição, verificou-se uma diferença em relação aos componentes mais afetados pelas ineficiências dos demais em termos absolutos (Tabela 13 e 26). Para o ponto de menor custo, os componentes mais afetados foram o compressor e a câmara de combustão, enquanto que para o ponto arbitrário foram a câmara de combustão e o pré-aquecedor. No geral, 68% da exergia destruída total na condição do sistema operando em menor custo é causada pelas ineficiências dos componentes individualmente, já para o ponto arbitrário essa parcela é de 41%.

Analisando-se as parcelas dos custos de destruição e das taxas de investimento evitáveis e inevitáveis, notou-se que as frações de contribuição de cada parcela para o mesmo componente foi muito distinta nas diferentes condições de operação, conforme indicado nas Tabelas 12 e 25. Destaca-se a turbina a gás que apresentou um resultado muito diferente em cada condição operacional. No ponto de menor custo, verificou-se que 219,5 \$/s podem ser evitados, enquanto que para o ponto arbitrário podem ser evitados 269,9 \$/s, 23% a mais que o de menor custo.

Com relação às parcelas endógenas e exógenas dos custos de destruição e taxas de investimento, as frações das parcelas para cada componentes foram distintas (Figuras 22 e 50). Além disso, observou-se que 604,4 \$/s no ponto de menor custo são devido às ineficiências dos componentes individualmente, o que representa 72% dos custos totais. Já para o ponto arbitrário, 451,9 \$/s são devidos às ineficiências dos componentes individualmente, o que representa 46% dos custos totais.

De um modo geral, pode-se observar que, apesar de em ambas condições a câmara de combustão se mostrar um componente de destaque, houve uma diferença significativa dos resultados da análise exergoeconômica convencional e avançada entre as condições de menor custo e a arbitrária.

Em seguida, comparou-se o sistema operando na condição de menor custo (Ponto Econômico) com o sistema operando em máxima eficiência exergética (Ponto Eficiência). A Tabela 29 mostra a variação percentual entre as variáveis termodinâmicas, custo e eficiência exergética entre tais condições.

Tabela 29. Comparação entre a condição de menor custo e a de maior eficiência.

	<b>Pto Econômico</b>	<b>Pto Eficiência</b>	<b>Diferença</b>
$P_2/P_1$	9,46	19,80	52,2%
$\eta_{AC}$	0,83	0,89	7,0%
$T_3$	600,4	517,7	16,0%
$\eta_{GT}$	0,88	0,90	2,1%
$T_4$	1210,9	1222,1	0,9%
<i>Custo (\$/s)</i>	0,33948	0,48228	29,6%
<i>Eficiência Exergética</i>	0,55485	0,58113	4,5%

Como é possível perceber, a diferença percentual entre as variáveis foi no máximo 16%, exceto pela razão de pressão do compressor que variou 52%. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, no processo de otimização, os limites para a razão de compressão foram grandes, portanto, para aumentar a eficiência exergética do sistema, os valores encontrados para essa razão tenderam a subir ao longo do processo de otimização. Com relação ao custo, houve uma variação expressiva, enquanto que, para a eficiência exergética, pôde-se observar uma pequena variação, indicando que a condição de menor custo tem uma eficiência relativamente próxima da maior encontrada para o sistema.

Analisando os resultados da análise exergoeconômica convencional, pôde-se observar que no ponto de maior eficiência a câmara de combustão também é o componente que mais destrói exergia do sistema, cerca de 69% da destruição exergética total, valor este muito próximo aos 65% para o ponto de menor custo (Figuras 19 e 31). É possível verificar também que a magnitude da destruição de exergia foi bem distinta entre as condições. Como visto nas Tabelas 9 e 16, o sistema operando na condição de menor custo destrói 36 MW de exergia, enquanto que na condição de maior eficiência destrói 32 MW (aproximadamente 8,4% menos).

Analisando os custos de destruição e taxas de investimento, constatou-se que os valores encontrados para os fatores exergoeconômicos foram bem distintos, sobretudo para o compressor, conforme indicados nas Tabelas 10 e 17. Como é possível notar, os

custos de investimento do compressor aumentaram significativamente com o aumento da sua eficiência, portanto, a contribuição dos investimentos no custo total deste componente encontrada foi muito significativa, cerca de 90%. Além disso, percebe-se que a câmara de combustão em ambos os casos apresentou um fator exergoeconômico baixo, 0,7% para o ponto de menor custo e 0,5% para o ponto arbitrário.

Já com relação a análise exergoeconômica avançada, analisando os valores percentuais obtidos nas parcelas evitáveis e inevitáveis das destruições exergéticas dos componentes individualmente indicados nas Figuras 21 e 33, pôde-se verificar que o potencial de melhoria dos componentes foi diferente nos casos analisados. Como visto, na condição do sistema operando em menor custo, o compressor e o pré-aquecedor foram os componentes com maior potencial, enquanto que para o sistema operando com maior eficiência, a câmara de combustão e o pré-aquecedor apresentaram maior potencial.

Analisando-se em valores absolutos, é possível notar que os componentes com maior potencial nas duas condições também é a câmara de combustão seguido do pré-aquecedor (Tabelas 11 e 18). É interessante ressaltar que, como no ponto de maior eficiência exergética os componentes estão operando com maior eficiência individualmente, todos estes, exceto a câmara de combustão, apresentaram uma parcela evitável muito pequena, sendo todas menor que 0,5 MW. Verificou-se que o sistema CGAM operando na condição de menor custo pode evitar 7,42 MW de perda de destruição exergética e na condição de maior eficiência, 6,55 MW, cerca de 11,6% menor.

Com relação às parcelas endógenas e exógenas de destruição, verificou-se que os componentes mais afetados pelas ineficiências dos demais em ambos os casos foram compressor e a câmara de combustão, conforme Tabelas 13 e 20. Como visto, 68% da exergia destruída total na condição do sistema operando em menor custo é causada pelas ineficiências dos componentes individualmente, já para o ponto de maior eficiência essa parcela é de 73%.

Em relação as parcelas dos custos de destruição e das taxas de investimento evitáveis e inevitáveis, foi possível notar que as frações de contribuição de cada parcela para o mesmo componente foi muito distinta nas diferentes condições, sobretudo para o compressor (Figura 22 e 34). No ponto de menor custo, verificou-se que 219,5 \$/s podem ser evitados, enquanto que para o ponto arbitrário podem ser evitados 778,7 \$/s,

254% a mais que o de menor custo. Essa grande diferença pode ser explicada pelo fato de, na condição de maior eficiência exergética, os componentes apresentaram custos de investimento muito elevados, como o compressor e a turbina, devido às suas altas eficiências, o que elevou consideravelmente os custos totais.

Analisando as parcelas endógenas e exógenas dos custos de destruição e taxas de investimento, pôde-se notar que as frações das parcelas para cada componentes foram distintas. Como visto nas Tabelas 14 e 21, para a condição de menor custo 604 \$/s são devido às ineficiências dos componentes individualmente, representando 72% dos custos totais, enquanto que para o sistema operando na condição de maior eficiência exergética, 1288,5 \$/s são devidos às ineficiências dos componentes individualmente, o que representa 85% dos custos totais.

Como é possível observar, notou-se uma diferença significativa entre as condições de menor custo e a arbitrária. Apesar de em ambas condições a câmara de combustão se mostrar um componente de destaque, os resultados da análise exergoeconômica convencional e avançada se mostraram muito distintos, sobretudo em relação aos custos de destruição dos componentes. Assim como observado anteriormente, a análise exergoeconômica se mostrou um retrato particular para cada condição de operação.

#### **5.4.2 Comparação entre Análise Exergoeconômica Convencional e Avançada**

Para fazer uma comparação da diferença entre a análise exergoeconômica convencional e avançada, foi estabelecida uma ordem de prioridade para melhoria do sistema adotando-se dois critérios: um critério baseado na exergia destruída e um critério baseado nos custos totais. Para o critério baseado na exergia destruída, a análise convencional irá fornecer a magnitude da exergia destruída, enquanto que a análise avançada irá indicar o quanto da exergia destruída pode, de fato, ser evitada para aquele determinado componente. A Tabela 30 indica a comparação da ordem de priorização entre a análise exergoeconômica convencional e avançada para cada condição de operação utilizando esse critério.

Tabela 30. Comparação entre Análise Exergoeconômica Avançada e Convencional utilizando o critério baseado na exergia destruída.

Ponto Arbitrário	Ponto Eficiência	Ponto Econômico
<i>Análise Convencional - Critério: <math>\dot{E}_D</math> [MW]</i>		
1° Câmara de Combustão	1° Câmara de Combustão	1° Câmara de Combustão
2° HRSG	2° HRSG	2° HRSG
3° Turbina a Gás	3° Turbina a Gás	3° Compressor
4° Compressor	4° Compressor	4° Turbina a Gás
5° Pré-Aquecedor	5° Pré-Aquecedor	5° Pré-Aquecedor
<i>Análise Avançada - Critério: <math>\dot{E}_D^{AV}</math> [MW]</i>		
1° Câmara de Combustão	1° Câmara de Combustão	1° Câmara de Combustão
2° Turbina a Gás	2° Pré-Aquecedor	2° Pré-Aquecedor
3° Compressor	3° HRSG	3° Compressor
4° Pré-Aquecedor	4° Turbina a Gás	4° Turbina a Gás
5° HRSG	5° Compressor	5° HRSG

Como é possível perceber, a primeira posição em ambas as análises e em todas as condições de operação é ocupada pela câmara de combustão. Esse resultado, como já discutido, se deve ao fato de que as irreversibilidades nesse componente são muito elevadas devido ao processo de combustão, portanto, a magnitude da destruição de exergia é muito elevada. Pode-se perceber ainda que a ordem de priorização, para uma mesma análise, é dependente da condição de operação. Esse resultado mostra a sensibilidade dos resultados das análises, seja esta convencional ou avançada, em relação as condições operativas do sistema CGAM.

É possível perceber também que, para uma mesma condição de operação, há uma diferença significativa na ordem de melhoria entre a análise convencional e avançada. Esse resultado indica que a análise convencional iria conduzir a uma priorização dos componentes não muito adequada, pois não notaria quanto de fato da exergia destruída é passível de ser diminuída. Portanto, a fragmentação da destruição exergética em parcelas evitáveis representa uma boa estratégia para determinar a priorização dos componentes.

Com relação ao critério de priorização envolvendo os custos totais, a análise convencional irá fornecer a magnitude dos custos de destruição e investimentos totais para cada componente, enquanto que a priorização pela análise avançada fará uso apenas das parcelas evitáveis dos custos de destruição e investimento. A Tabela 31

indica a comparação da ordem de priorização entre a análise exergoeconômica convencional e avançada para cada condição de operação utilizando tal critério.

Tabela 31. Comparação entre Análise Exergoeconômica Avançada e Convencional utilizando o critério baseado em custos totais.

Ponto Arbitrário	Ponto Eficiência	Ponto Econômico
<i>Análise Convencional - Critério: <math>\dot{C}_D + Z</math> [\$ / h]</i>		
1° Câmara de Combustão	1° Compressor	1° Câmara de Combustão
2° HRSG	2° Câmara de Combustão	2° HRSG
3° Turbina a Gás	3° Turbina a Gás	3° Turbina a Gás
4° Compressor	4° HRSG	4° Compressor
5° Pré-Aquecedor	5° Pré-Aquecedor	5° Pré-Aquecedor
<i>Análise Avançada - Critério: <math>\dot{C}_D^{AV} + \dot{Z}^{AV}</math> [\$ / h]</i>		
1° Turbina a Gás	1° Compressor	1° Câmara de Combustão
2° Câmara de Combustão	2° Câmara de Combustão	2° Compressor
3° Compressor	3° Turbina a Gás	3° Turbina a Gás
4° Pré-Aquecedor	4° HRSG	4° Pré-Aquecedor
5° HRSG	5° Pré-Aquecedor	5° HRSG

Comparando os resultados, nota-se que, para um mesmo tipo de análise, convencional ou avançada, os resultados dependem das condições de operação. Esse resultado aponta mais uma vez para a sensibilidade dos resultados das análises em relação as condições operacionais do sistema. Percebe-se ainda que, para uma mesma condição, houve uma diferença em relação aos resultados dos análises convencional e avançada, salvo para a condição de maior eficiência onde a priorização entre ambas foi semelhante, possivelmente pelo fato de que os custos dos componentes cresceram muito e suas parcelas evitáveis acompanharam tal crescimento.

No geral, é possível verificar que a priorização envolvendo a análise avançada, por estar focada apenas nas parcelas que de fato podem ser evitadas, conduz uma priorização mais adequada do ponto de vista prático para os componentes do sistema.

Ainda no contexto da comparação dos resultados em relação às análises convencional e avançada, buscou-se verificar se seria viável e adequada a utilização das informações da análise exergoeconômica avançada acopladas a um método de otimização no sentido de facilitar o caminho até a condição ótima do sistema, assim como feito por VIEIRA [3]. Ou seja, a hipótese seria a de que o método de otimização poderia se valer da ordem de priorização dos componentes estabelecida pela análise

avançada para alterar prioritariamente as variáveis termodinâmicas mais associadas a aquele determinado componente para marchar em direção ao ótimo.

Para essa verificação, inicialmente foram comparados os “desvios” entre condições ótimas e não-ótimas para cada um dos componentes no sentido de verificar o quão longe da solução a condição não-ótima estaria da condição ótima. A partir desses resultados, é estabelecida uma ordenação dos componentes, ranqueando os componentes mais distantes da condição ótima, para que seja identificado aqueles que deveriam ser alterados primeiro no algoritmo de otimização de maneira a facilitar o caminho em direção ao ótimo. Em seguida, comparou-se essa ordenação com aquela oriunda das análises exergoeconômicas convencional e avançada.

Inicialmente a condição ótima adotada foi a de maior eficiência e as não-ótimas foram a de menor custo e a arbitrária. Como a otimização no sentido de aumentar a eficiência acaba levando à diminuição das destruições exergéticas, o parâmetro candidato a indicar o desvio entre a condição ótima e não-ótima escolhido foi a diferença de exergia destruída entre tais condições. As tabelas 32 e 33 indicam esses desvios.

Tabela 32. Desvio entre a condição Ótima (Ponto Eficiência) e Não-ótima (Ponto Arbitrário) utilizando a exergia destruída.

	Ponto Arbitrário (Não-Ótimo) $\dot{E}_D$ [MW]	Ponto Eficiência (Ótimo) $\dot{E}_D$ [MW]	Diferença	% Total
<i>Compressor</i>	4,81	<b>1,67</b>	3,14	17,7%
<i>Câmara de Combustão</i>	29,93	<b>22,86</b>	7,07	39,7%
<i>Turbina a Gás</i>	5,99	<b>2,75</b>	3,24	18,2%
<i>HRSG</i>	6,44	<b>5,00</b>	1,44	8,1%
<i>Pré-Aquecedor</i>	3,61	<b>0,71</b>	2,90	16,3%
		<b>SOMA</b>	17,80	100%



Tabela 33. Desvio entre a condição Ótima (Ponto Eficiência) e Não-ótima (Ponto Econômico) utilizando a exergia destruída.

	Ponto Econômico (Não-Ótimo)	Ponto Eficiência (Ótimo)	Diferença	% Total
	$\dot{E}_D$ [MW]	$\dot{E}_D$ [MW]		
<i>Compressor</i>	2,75	<b>1,67</b>	1,08	36,1%
<i>Câmara de Combustão</i>	23,46	<b>22,86</b>	0,60	20,0%
<i>Turbina a Gás</i>	2,62	<b>2,75</b>	-0,12	-4,1%
<i>HRSG</i>	4,91	<b>5,00</b>	-0,09	-3,0%
<i>Pré-Aquecedor</i>	2,24	<b>0,71</b>	1,53	51,0%
		<b>SOMA</b>	3,00	100%

A partir dos desvios encontrados entre as condições, foi estabelecida uma ordenação dos componentes utilizando como critério os maiores desvios. Essa ordenação indica quais componentes foram majoritariamente alterados para aumentar a eficiência do sistema. Tal ordenação foi confrontada com aquela obtida com as análises exergoeconômicas convencional e avançada. As Tabelas 34 e 35 indicam os resultados.

Tabela 34. Comparação entre a ordenação segundo os desvios de exergia destruída e as prioridades para Ponto Arbitrário (Não-Ótimo).

Ponto Arbitrário (Não-Ótimo)		
"Desvio" do Ótimo	Análise Convencional	Análise Avançada
1° Câmara de Combustão	1° Câmara de Combustão	1° Câmara de Combustão
2° Turbina	2° HRSG	2° Turbina a Gás
3° Compressor	3° Turbina a Gás	3° Compressor
4° Pré-Aquecedor	4° Compressor	4° Pré-Aquecedor
5° HRSG	5° Pré-Aquecedor	5° HRSG

Tabela 35. Comparação entre a ordenação segundo os desvios de exergia destruída e as prioridades para Ponto Econômico (Não-Ótimo).

Ponto Econômico (Não-Ótimo)		
"Desvio" do Ótimo	Análise Convencional	Análise Avançada
1° Pré-Aquecedor	1° Câmara de Combustão	1° Câmara de Combustão
2° Compressor	2° HRSG	2° Pré-Aquecedor
3° Câmara de Combustão	3° Compressor	3° Compressor
4° HRSG	4° Turbina a Gás	4° Turbina a Gás
5° Turbina a Gás	5° Pré-Aquecedor	5° HRSG

Inicialmente, verifica-se que não há correspondência entre a ordenação a partir dos desvios e a priorização da análise convencional para ambas condições não-ótimas. Entretanto, nota-se que para o ponto Arbitrário houve uma correspondência total entre a ordenação a partir dos desvios com a análise exergoeconômica avançada. Esse resultado indica que as informações trazidas com a análise exergoeconômica avançada indicam um bom caminho para um eventual algoritmo de otimização acoplado a análise marchar em direção ao ótimo. Já para o ponto Econômico, comparando-se a ordenação a partir dos desvios com a priorização da análise exergoeconômica avançada, pode-se verificar que as três primeiras posições foram ocupadas pelos mesmos componentes, assim como as duas últimas. Essa ligeira alteração pode ter sido explicada pelo fato de que os valores dos desvios entre as três primeiras foram próximas, portanto, para um eventual método de otimização, iniciar o algoritmo modificando as variáveis mais associadas a qualquer um dos três primeiros componentes seria equivalente.

Em seguida, adotou-se como condição ótima a de menor custo e como não-ótimas a de maior eficiência e a arbitrária. Nesse caso, o parâmetro candidato a indicar o desvio entre a condição ótima e não ótima é a diferença de custos totais entre tais condições uma vez que no processo de otimização busca-se encontrar o menor custo. As Tabelas 36 e 37 indicam esses desvios.

Tabela 36. Desvio entre a condição Ótima (Ponto Econômico) e Não-ótima (Ponto Arbitrário) utilizando os custos totais.

	Ponto Arbitrário (Não-Ótimo)	Ponto Econômico (Ótimo)	Diferença	% Total
	$\dot{C}_D + \dot{Z}$ [\$/h]	$\dot{C}_D + \dot{Z}$ [\$/h]		
<i>Compressor</i>	125,10	<b>94,76</b>	30,34	22,2%
<i>Câmara de Combustão</i>	479,15	<b>435,99</b>	43,16	31,6%
<i>Turbina a Gás</i>	131,41	<b>105,71</b>	25,70	18,8%
<i>HRSG</i>	141,91	<b>132,04</b>	9,87	7,2%
<i>Pré-Aquecedor</i>	95,04	<b>67,33</b>	27,70	20,3%
		<b>SOMA</b>	136,77	100%

Tabela 37. Desvio entre a condição Ótima (Ponto Econômico) e Não-ótima (Ponto Eficiência) utilizando os custos totais.

	Ponto Eficiência (Não-Ótimo)	Ponto Econômico (Ótimo)	Diferença	% Total
	$\dot{C}_D + \dot{Z}$ [\$/h]	$\dot{C}_D + \dot{Z}$ [\$/h]		
<i>Compressor</i>	577,46	<b>94,76</b>	482,69	71,4%
<i>Câmara de Combustão</i>	537,49	<b>435,99</b>	101,50	15,0%
<i>Turbina a Gás</i>	194,60	<b>105,71</b>	88,90	13,2%
<i>HRSG</i>	171,43	<b>132,04</b>	39,39	5,8%
<i>Pré-Aquecedor</i>	30,67	<b>67,33</b>	-36,66	-5,4%
		<b>SOMA</b>	675,83	100%

Assim como feito anteriormente, foi estabelecida a ordenação dos componentes utilizando como critério os desvios encontrados em relação aos custos totais. Essa ordenação indica quais componentes deveriam ser alterados prioritariamente para reduzir os custos individualmente e consequentemente diminuir o custo total do sistema. Tal ordenação também foi comparada com aquela obtida com as análises exergoeconômica convencional e avançada com o sentido de identificar as correspondências. As Tabelas 38 e 39 indicam os resultados.

Tabela 38. Comparação entre a ordenação segundo os desvios de custos totais e as priorizações para Ponto Arbitrário (Não-Ótimo).

	Ponto Arbitrário (Não Ótimo)	
"Desvio" do Ótimo	Análise Convencional	Análise Avançada
1° Câmara de Combustão	1° Câmara de Combustão	1° Turbina a Gás
2° Compressor	2° HRSG	2° Câmara de Combustão
3° Pré-Aquecedor	3° Turbina a Gás	3° Compressor
4° Turbina a Gás	4° Compressor	4° Pré-Aquecedor
5° HRSG	5° Pré-Aquecedor	5° HRSG

Tabela 39. Comparação entre a ordenação segundo os desvios de custos totais e as priorizações para Ponto Eficiência (Não-Ótimo).

	Ponto Eficiência (Não Ótimo)	
"Desvio" do Ótimo	Análise Convencional	Análise Avançada
1° Compressor	1° Compressor	1° Compressor
2° Câmara de Combustão	2° Câmara de Combustão	2° Câmara de Combustão
3° Turbina a Gás	3° Turbina a Gás	3° Turbina a Gás
4° HRSG	4° HRSG	4° HRSG
5° Pré-Aquecedor	5° Pré-Aquecedor	5° Pré-Aquecedor

Pode-se verificar que não há correspondência entre a ordenação a partir dos desvios com a priorização obtida com a análise convencional para ambas condições não-ótimas. Entretanto, é possível notar que houve uma correspondência total entre com a priorização obtida com a análise avançada. Já para o ponto arbitrário, apesar de ter havido a correspondência de apenas da caldeira, deve-se notar que a variação percentual dos demais componentes foram próximas, portanto, para um eventual método de otimização, iniciar o algoritmo modificando as variáveis mais associadas a qualquer um desses componentes seria equivalente.

Dessa maneira, foi possível perceber que a ordem de priorização trazida com a análise exergoeconômica avançada fornece indicações dos componentes que devem ser alterados prioritariamente em um método de otimização acoplado a uma análise exergoeconômica avançada. Portanto, nota-se que análise exergoeconômica avançada fornece informações que podem indicar um bom caminho por onde um eventual método de otimização pode marchar em direção ao ótimo.

## 6. Conclusões

Inicialmente, pode-se perceber que a utilização dos métodos de otimização híbridos apresentaram resultados satisfatórios para a obtenção das condições de menor custo e de maior eficiência exergética. Comparando a condição de menor custo com aquelas utilizadas na literatura, percebeu-se que os métodos híbridos apresentaram um desempenho superior aos demais. Dessa maneira, tais resultados consolidaram as formulações híbridas utilizadas para a otimização das funções objetivo discutidas neste trabalho.

Em seguida, foi feita a análise do comportamento do sistema CGAM operando em diferentes condições de operação para ter um retrato da influência das condições nos resultados da análise exergoeconômica convencional e avançada. As condições foram a do sistema operando em menor custo, maior eficiência exergética e em uma condição arbitrária. Comparando as condições de menor custo e arbitrária, verificou-se que apesar de, em geral, ter sido notada uma pequena variação entre variáveis termodinâmicas das condições de operação analisadas, os resultados das análises convencional e avançada foram bem distintos. Como foi possível notar, o sistema operando na condição arbitrária tem quase 80% a mais de destruição de exergia que poderia ser evitada. Com relação aos custos, verificou-se que seria possível evitar 23% a mais de custos totais na condição de maior eficiência do que quando operando em uma condição de menor custo. Além disso, foi possível notar os componentes que são mais afetados pelas ineficiências dos demais em cada condição.

Comparando o ponto de menor custo com o de maior eficiência foi possível verificar uma diferença mais significativa entre as variáveis termodinâmicas, sobretudo a razão de pressão do compressor. Foi possível observar que, como já esperado, na condição de maior eficiência, as eficiências dos componentes individualmente subiram, o que provocou uma redução da exergia destruída. Entretanto, os custos de investimento aumentaram substancialmente, com destaque para o compressor e turbina. Com relação aos custos evitáveis, poderia-se evitar 254% a mais na condição de maior eficiência do que na condição de menor custo. Observou-se também que os componentes mais afetados pelas ineficiências dos demais são diferentes em cada condição.

A partir dessas comparações, foi possível constatar que o desempenho exergoeconômico de um sistema é um retrato particular da condição de operação. Sendo

assim, cada caso deve ser analisado separadamente, tendo suas parcelas de destruição exergética, custos de destruição e taxas de investimento levantadas para que sejam adotadas as melhores medidas para melhoria em cada caso.

Em seguida foi feita uma comparação entre a análise exergoeconômica convencional e avançada com relação a ordem de priorização dos componentes para melhoria do sistema. Constatou-se que, para uma mesma condição de operação, as análises exergoeconômicas avançadas conduziram a uma priorização diferente daquela obtida com uma análise convencional para as três condições analisadas, tanto para o critério baseado na exergia destruída quanto para o critério baseado em custos totais. Comprovou-se que a fragmentação da destruição exergética e dos custos de investimento e destruição em parcelas evitáveis representa uma boa estratégia para determinar a priorização dos componentes.

Com o presente trabalho também foi possível observar a viabilidade de um trabalho futuro de implementação de um algoritmo de otimização acoplado a análise exergoeconômica avançada no sentido de facilitar o caminho até a condição ótima. Como visto, houve uma boa correspondência das ordenações utilizando os desvios das condições ótimas com as não-ótimas com a priorização obtida com a análise exergoeconômica avançada. Esse resultado indica que a priorização utilizando a análise avançada fornece de forma adequada indicadores dos componentes a serem modificados inicialmente para facilitar a trajetória até a condição ótima desejada.

## 7. Referências Bibliográficas

- [1] JUNIOR, A. S., MAIA, A. C. B., ANDREZA, F. M. P. *et al.*, “Nota Técnica DEA 13/14 Demanda de Energia 2050”, *Estudos de Demanda de Energia, Empresa de Pesquisa Energética*, Brasil, 2014.
- [2] GODOI, G. S., PERIM, A. G. L., BRAGA, B. M. M. A., RIBEIRO, I. G. *et al.*, “Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro”, *Ministério de Minas e Energia*, Brasil, Novembro, 2016.
- [3] MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N., “Fundamentals of Engineering Thermodynamics”, *New York, John Wiley & Sons*, 3rd ed, Nova Iorque, 1995.
- [4] VIEIRA, L. S., “Modelo Exerconômico Iterativo para Melhoria de Sistemas Térmicos Complexos Integrado a um Simulador de Processos Profissional”, *COPPE-UFRJ*, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- [5] PETRAKOPOULOU, F., TSATSARONIS, G., MOROSUK, T., CARASSAI, A., “Conventional and advanced exergetic analyses applied to a combined cycle power plant”, *Energy*, 2011
- [6] FALLAH, M., SIYAH, H., GHIASI, R. A. *et al.*, “Comparison of different gas turbine cycles and advanced exergy analysis of the most effective”, *Energy*, v. 116, pp. 701-715, 2016.
- [7] GALINDO, J., RUIZ, S., DOLZ, V., ROYO-PASCUAL, L., “Advanced exergy analysis for bottoming organic rankine cycle coupled to an internal combustion engine”, *Energy Conversion and Management*, v. 126, pp. 217-227, 2016.
- [8] FU, P., WANG, N., WANG, L., *et al.*, “Performance degradation diagnosis of thermal power plants: A method based on advanced exergy analysis”, *Energy Conversion and Management*, v. 130, pp. 219-229, 2016.
- [9] BALLI, O., “Advanced exergy analyses to evaluate the performance of a military aircraft turbojet engine (TJE) with afterburner system: Splitting exergy destruction into unavoidable/avoidable and endogenous/exogenous”, *Applied Thermal Engineering*, v. 111, pp. 152-169, 2017.
- [10] SIAHAYA, Y., “Thermoeconomic Analysis and Optimization of Gas Turbine Power Plant”, *International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion*, Dezembro, Coréia do Sul, 2009.

- [11] TSATSARONIS, G., “Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy Systems”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol.19, pp. 227-257,1993.
- [12] BAGHERNEJAD., A., YAGHOUBI, M., “Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm”, *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp. 2193–2203, 2011.
- [13] NERY, R. S., ROLNIK, V., "Métodos Híbridos para Otimização global não-linear", *Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*, Florianópolis, SC, Brasil, 2007.
- [14] BEJAN, A., TSATSARONIS, G., MORAN, M. “Thermal Design & Optimization”, *John Wiley & Sons, Inc.*, 1996.
- [15] KELLY, S., “Energy systems improvement based on endogenous and exogenous exergy destruction,” VDI-Verl., Düsseldorf, 2008.
- [16] TSATSARONIS, G., PARK, M. H., “On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems”, *Energy Conversion and Management*, vol. 43, pp. 1259-1270, 2002.
- [17] KELLY, TSATSARONIS, G., MOROSUK, T, “Advanced exergetic analysis: Approaches for splitting the exergy destruction into endogenous and exogenous parts,” *Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 384 – 391, 2009.
- [18] TSATSARONIS, G., MOROSUK, T., “A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines,” *Energy*, vol. 33, no. 6, pp. 890–907, Jun. 2008.
- [19] ABREU, A. S., “Análise Exergética Avançada Aplicada a uma Unidade Marítima de Produção de Petróleo”, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.
- [20] MOROSUK, T., TSATSARONIS, G., KELLY, S. O., “Endogenous and Exogenous exergy destruction in thermal systems”, *2006 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Chicago, Illinois, EUA, 2006.
- [21] TSATSARONIS, G., LAZZARETTO, A., “On the calculation of efficiencies and costs in thermal systems”, *Proceedings of the ASM Advanced Energy Systems Division*, v. 39, pp. 421–430, New York, 1997.
- [22] LOZANO, M. A., VALERO, A., 1993, “Theory of the Exergetic Cost”, *Energy*, v. 18, pp. 939-960.
- [23] PETRAKOPOULOU, F., TSATSARONIS, G., MOROSUK, T., et al. "Advanced Exergoeconomic Analysis Applied to a Complex Energy Conversion System", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 134, Março, 2012.



- [24] COLAÇO, M. J.; ORLANDE, H. R. B.; DULIKRAVICH G. S. "Inverse and Optimization Problems in Heat Transfer", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 28, n.1, pp. 1-24, Brasil, 2006.
- [25] JOURDAN, L.; BASSEUR, M.; TALBI, E.G. "Hybridizing exact methods and metaheuristics: A taxonomy", European Journal of Operational Research, v. 199, n. 3, p. 620-629, 2009.
- [26] ZADEH, P. M., SOKHANSEFAT, T., KASAEIAN, A. B., et al, "Hybrid Optimization algorithm for thermal analysis in a solar parabolic trough collector based on nanfluid", Energy, 1-8, 2015.
- [27] DOMINKOVIC, D. F., COSIC, B., MEDIC, B., et al., "A hybrid optimization model of biomass trigeneration system combined with pit thermal energy storage", Energy Conversion and Management, 2015.
- [28] FRANGOPOULOS, C., TSATSARONIS, G., VALERO, A., et al. "CGAM Problem: Definition and Conventional Solution", Energy, v. 19, n. 3, pp. 279-286, 1993.
- [29] PIRES, T. S., "Método de Superfície de Resposta Aplicado à Otimização Termoeconômica de Sistemas de Cogeração Modelados em um Simulador de Processos", *COPPE-UFRJ*, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.
- [30] PADILHA, R. S., "Otimização de um Sistema de Cogeração de Referência Utilizado Métodos de Gradiente, Evolucionário e Híbrido: Um Estudo Comparativo", *COPPE-UFRJ*, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

## ANEXO A - Sistema CGAM proposto por VALERO *et al.*

Modelo Físico e Termodinâmico:

- Compressor

$$T_2 = T_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{CA}} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} - 1 \right] \right\}$$
$$P_1 = P_0 \text{ e } T_1 = T_0$$
$$\dot{W}_{CA} = \dot{m}_a c_{P,a} (T_2 - T_1)$$

- Câmara de Combustão

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a + \dot{m}_f$$
$$\dot{m}_a h_3 + \dot{m}_f PCI = \dot{m}_g h_4 + \dot{Q}_{CC}, \text{ com } PCI = 50000 KJ/Kg$$
$$\dot{Q}_{CC} = \dot{m}_f PCI (1 - \eta_{CC}), \text{ com } \eta_{CC} = 0,98$$
$$P_4 = P_3 (1 - \Delta P_{CC}), \text{ com } \Delta P_{CC} = 0,05$$

- Pré-Aquecedor

$$\dot{m}_a c_{P,a} (T_3 - T_2) = \dot{m}_g c_{P,g} (T_5 - T_6)$$
$$P_3 = P_2 (1 - \Delta P_{a,PA}), \text{ com } \Delta P_{a,PA} = 0,05$$
$$P_6 = P_5 (1 - \Delta P_{g,PA}), \text{ com } \Delta P_{g,PA} = 0,05$$

- Turbina a Gás

$$T_5 = T_4 \left\{ 1 - \frac{1}{\eta_{TG}} \left[ 1 - \left( \frac{P_4}{P_5} \right)^{\frac{1 - \gamma_g}{\gamma_g}} \right] \right\}$$
$$\dot{W}_{TG} = \dot{m}_g c_{P,g} (T_4 - T_5)$$
$$\dot{W}_{liq} = \dot{W}_{TG} - \dot{W}_{CA}, \text{ com } \dot{W}_{TG} = 30 MW$$

- Caldeira de Recuperação (HRSG)

$$T_{8P} = T_9 - \Delta T_A, \text{ com } \Delta T_A = 15 K$$
$$\dot{m}_g c_{P,g} (T_6 - T_{7P}) = \dot{m}_s (h_9 - h_{8P})$$
$$\dot{m}_s = 14 \text{ kg/s}$$

$$(h_9 - h_{8P}) = 1956 \text{ kJ/kg}$$

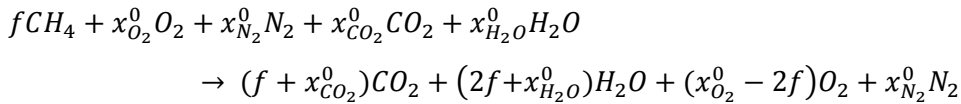
$$\Delta T_P = T_{7P} - T_9 > 0$$

$$T_7 = T_6 - \dot{m}_s \frac{(h_9 - h_{8P})}{\dot{m}_g c_{p,g}}$$

$$P_0 = P_6(1 - \Delta P_{GV}), \text{ com } \Delta P_{GV} = 0,05$$

Para o sistema CGAM, o ambiente de referência se encontra a pressão atmosférica ( $P_0$ ) de 1,013 bar e temperatura ( $T_0$ ) de 298,15K. No modelo, o ar é considerado como tendo 60% de umidade relativa, calor específico a pressão constante ( $c_{P,a}$ ) igual a 1,004 kJ/(kg.K), e razão entre os calores específicos ( $\gamma_a$ ) de 1,40, constante do gás ( $R_a$ ) igual a 0,287 kJ/(kg.K), massa molar de 28,648kg/kmol, além de ser composto por uma mistura de  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$  cujas frações molares são 0,2059, 0,7748, 0,0003 e 0,019, respectivamente. Nesse ambiente os valores de energia e exergia são dados como zero. Os gases de combustão possuem calor específico a pressão constante ( $c_{P,g}$ ) de 1,170 kJ/(kg.K), razão entre calores específicos de ( $\gamma_g$ ) de 1,33 e constante do gás ( $R_g$ ) igual a 0,290 kJ/(kg.K).

A seguir é apresentada a combustão do Metano que ocorre dentro da câmara de combustão.



Para o combustível é suposto que o mesmo possua massa molar igual a 16,043 kg/kmol e energia ( $h$ ) e exergia ( $e$ ) específicas de 50000kJ/kg e 51850 kJ/kg, respectivamente. Todas as adições de energia que ocorrem no gerador de vapor são consideradas conhecidas e são apresentadas a seguir.

$$e_9 - e_8 = h_9 - h_8 - T_0(s_9 - s_8) = 910 \text{ kJ/kg}$$

$$e_9 - e_{8P} = h_9 - h_{8P} - T_0(s_9 - s_{8P}) = 754 \text{ kJ/kg}$$

$$(h_9 - h_8) = 2690 \text{ kJ/kg}$$

$$(h_9 - h_{8P}) = 1956 \text{ kJ/kg}$$

As equações para o cálculo de exergia e energia das correntes de ar 1, 2 e 3 são apresentadas abaixo:

$$e_i = c_{P,a} \left( T_i - T_0 - T_0 \ln \frac{T_i}{T_0} \right) + R_a T_0 \ln \frac{P_i}{P_0}$$

$$h_i = c_{P,a} (T_i - T_0)$$

Já para obtenção da exergia e energia das correntes 4, 5, 6 e 7, utilizam-se as seguintes equações:

$$e_i = c_{P,g} \left( T_i - T_0 - T_0 \ln \frac{T_i}{T_0} \right) + R_g T_0 \ln \frac{P_i}{P_0} + R_g T_0 \sum_j x_j^i \ln \frac{x_j^i}{x_j^0}, j$$

$$= O_2, N_2, CO_2 \text{ e } H_2O$$

$$h_i = c_{P,g} (T_i - T_0)$$

## ANEXO B – Otimização da Função Objetivo (Custo)

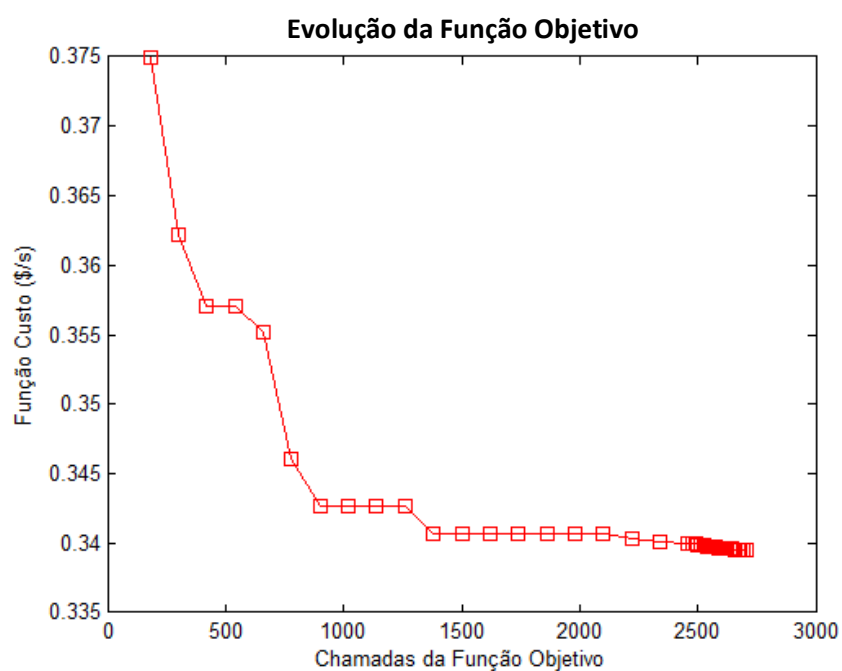


Figura 51. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 1.

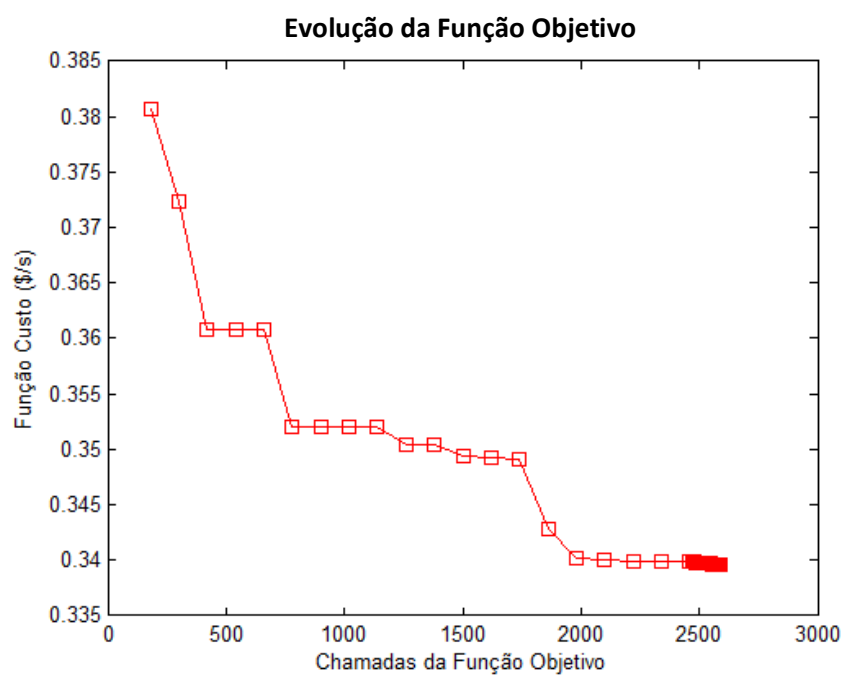


Figura 52. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 2.

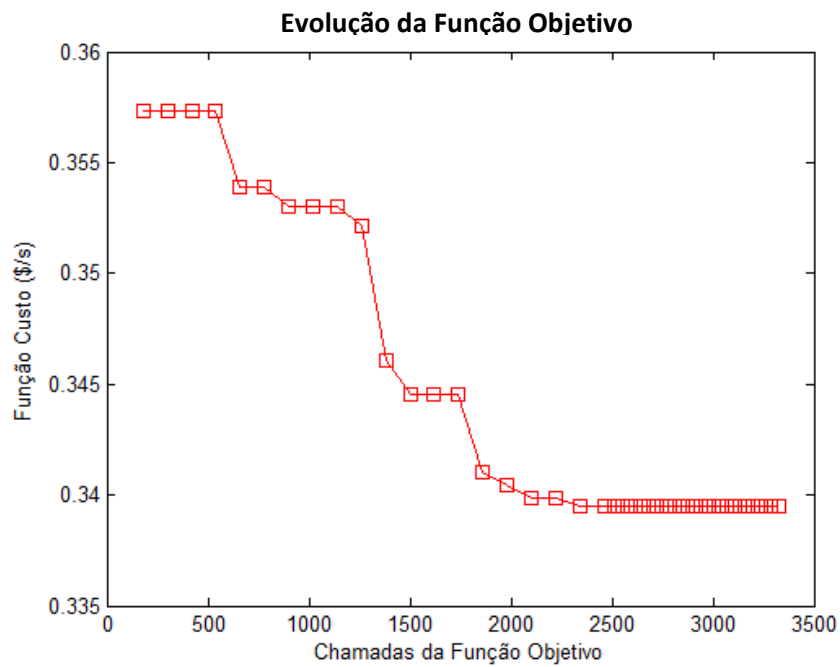


Figura 53. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 3.

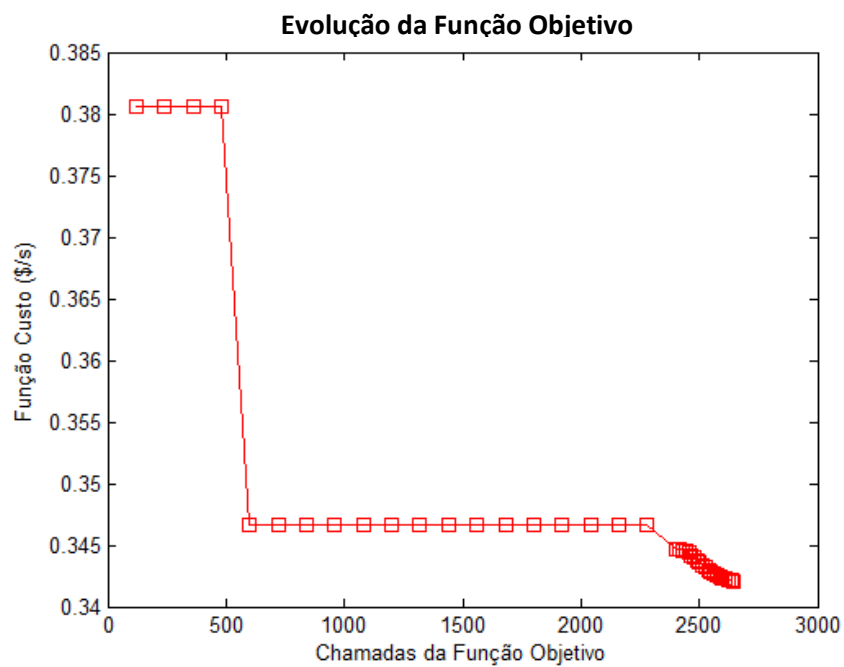


Figura 54. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 4.

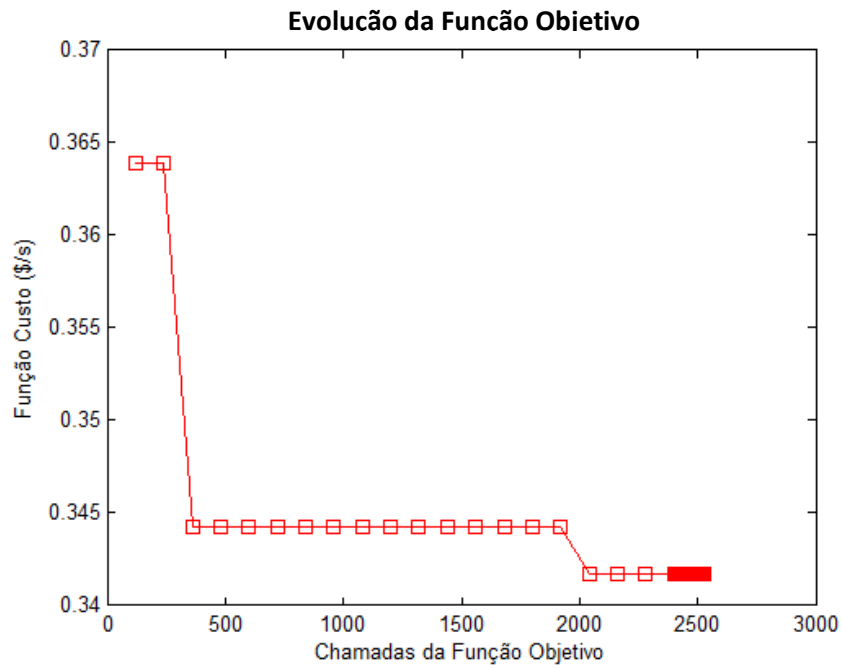


Figura 55. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 5.

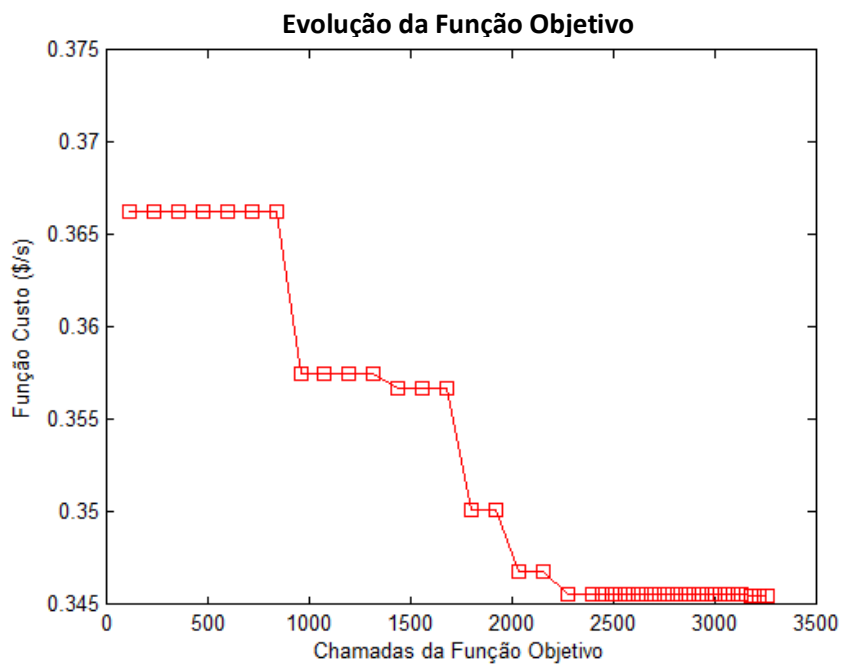


Figura 56. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 6.

## ANEXO C – Otimização da Função Objetivo (Eficiência Exergética)

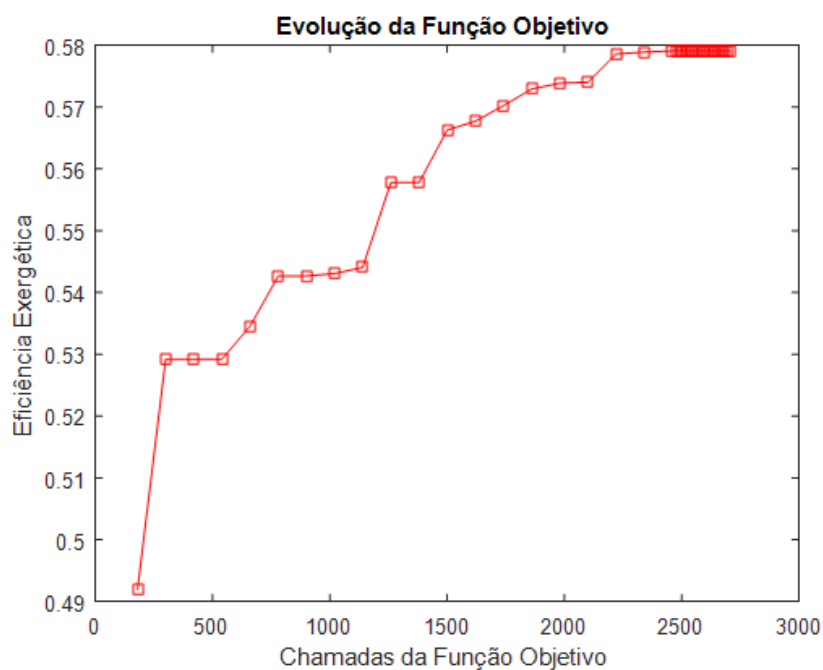


Figura 57. Evolução da Função Objetivo para o Híbrido 1.

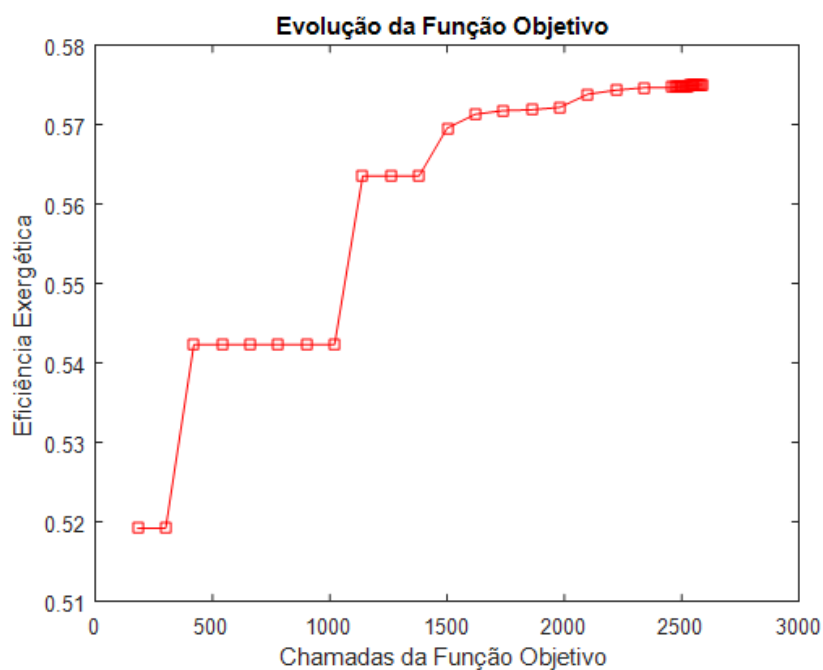


Figura 58. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 2.



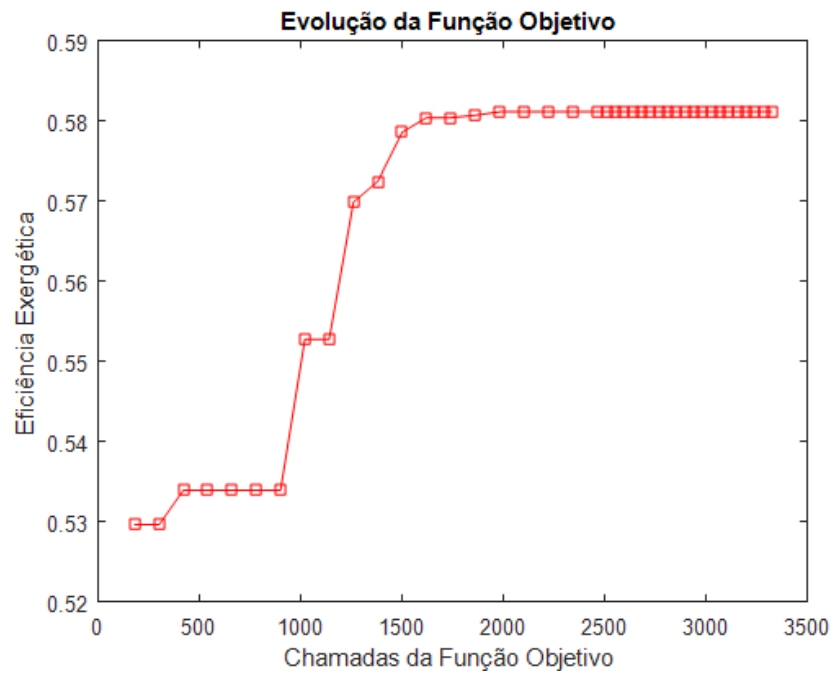


Figura 59. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 3.

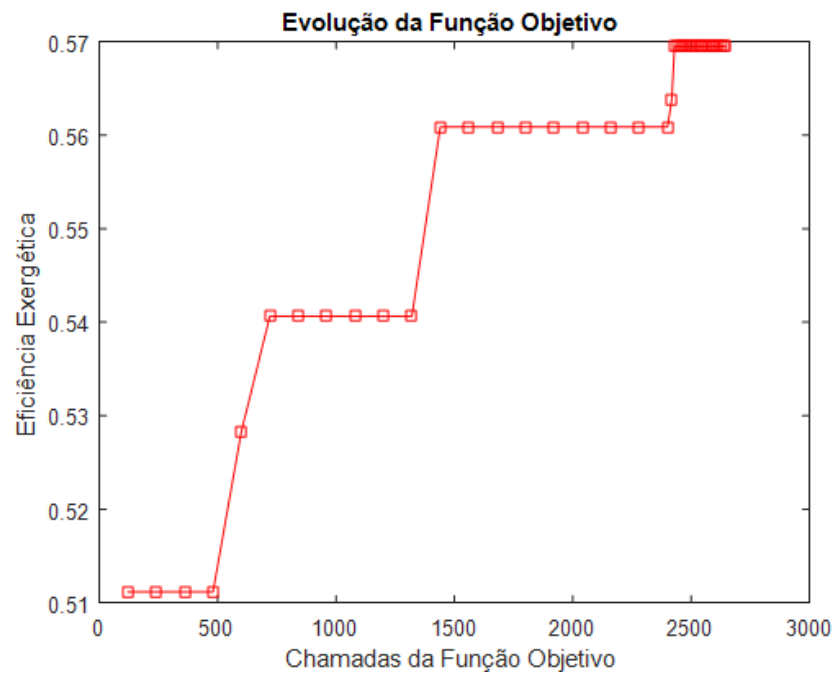


Figura 60. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 4.

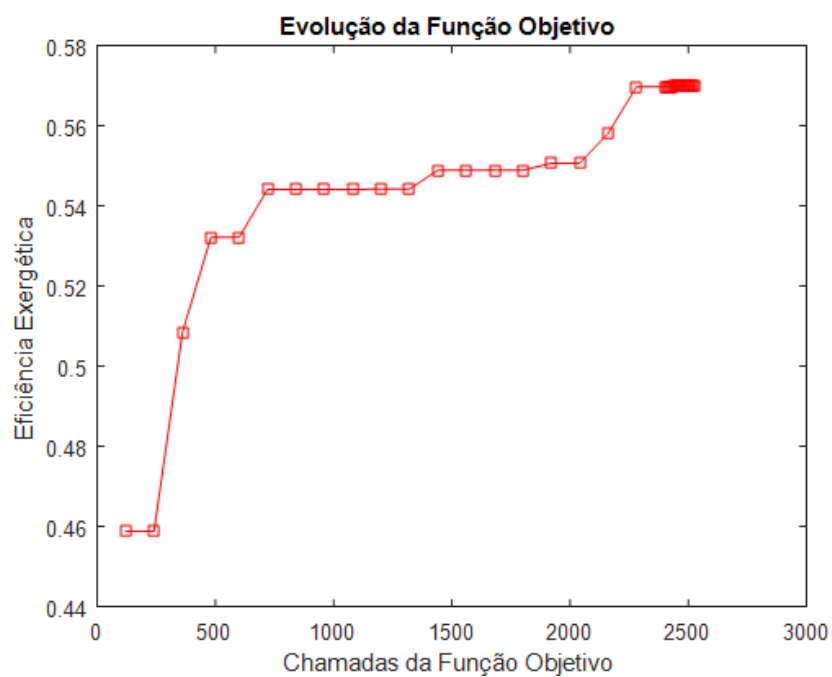


Figura 61. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 5.

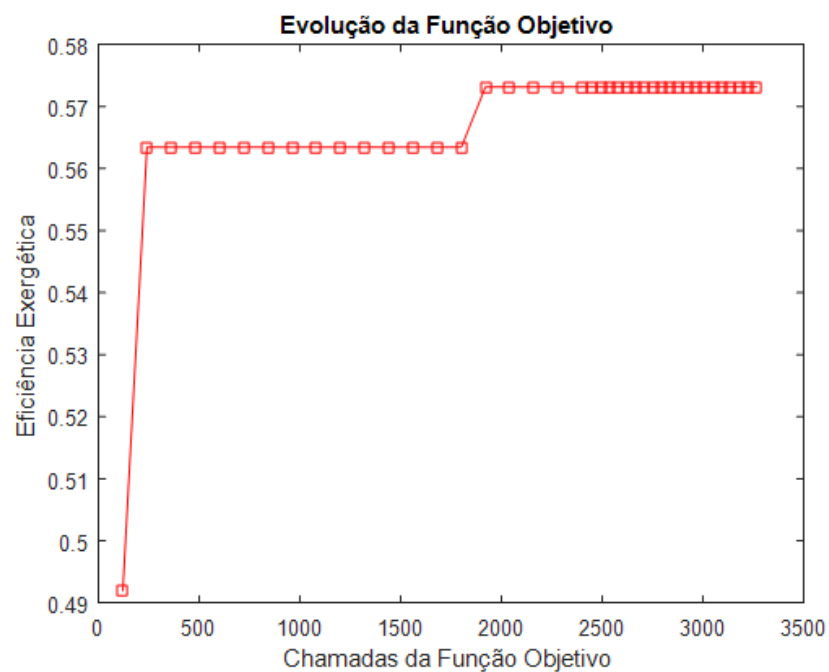


Figura 62. Evolução da Função Objetivo para Híbrido 6.